



TITLE:

越流型および非越流型水制がもたらす局所洗掘と粒度変化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

水谷, 英朗

CITATION:

水谷, 英朗. 越流型および非越流型水制がもたらす局所洗掘と粒度変化に関する研究. 京都大学, 2011, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2011-09-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k16370>

RIGHT:

越流型および非越流型水制がもたらす局所洗掘
と粒度変化に関する研究

2011 年

水谷 英朗

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の目的	8
1.3 本論文の構成	9
参考文献	10
第2章 水制周辺の流れ及び河床変化に関する既往研究	11
2.1 概説	11
2.2 実験水路を用いた既往研究	11
2.3 数値解析を用いた既往研究	24
参考文献	30
第3章 混合砂河床を用いた水制周辺の局所洗掘に関する実験	35
3.1 はじめに	35
3.2 実験条件と実験方法	35
▼3.2.1 実験水路	35
▼3.2.2 水理条件	37
▼3.2.3 河床材料条件と実験ケース	37
▼3.2.4 河床高の計測方法	42
▼3.2.5 河床表層粒度分布の計測方法	42
▼3.2.6 流れ場の計測方法	43
3.3 実験結果とその考察	45
▼3.3.1 洗掘孔の拡大過程	45
▼3.3.2 均一砂と混合砂の河床形状	46
▼3.3.3 最大洗掘深と粒度分布の関係	51
▼3.3.4 非越流型水制周辺の流れの構造	55
▼3.3.5 水制周辺の河床粒度変化特性	63
3.4 まとめ	71
参考文献	73

第4章 水制の越流状態が洗掘および粒度変化に与える影響	75
4.1 はじめに	75
4.2 実験条件と実験方法	75
4.3 実験結果とその考察	77
▼4.3.1 局所洗掘と水制高の関係	77
▼4.3.2 水制高と水制背後域への土砂堆積	85
▼4.3.3 河床粒度分布が越流型水制周辺の河床変化に与える影響	87
▼4.3.4 越流状態の違いが水制周辺の流れ場に与える影響	94
▼4.3.1 水制高と河床粒度分布変化の関係	104
4.4 まとめ	109
参考文献	112
第5章 水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する数値解析	113
5.1 概説	113
5.2 掃流砂のモデリング	113
▼5.2.1 平衡掃流砂量式	113
▼5.2.2 流砂の非平衡性を考慮した流砂量式およびモデル	117
5.3 3次元流れと流砂の非平衡性を考慮した河床変動モデル	119
▼5.3.1 3次元流れの計算手法	119
▼5.3.2 非平衡流砂モデルによる河床変動計算手法	131
▼5.3.3 OpenMPによる砂粒経路の並列計算	143
5.4 平坦および洗掘河床における水制周辺3次元流れの数値解析	144
▼5.4.1 計算ケースおよび計算条件	144
▼5.4.2 計算結果と考察	145
▼5.4.3 線形と非線形k-εモデルの計算結果比較	156
5.5 混合砂非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動シミュレーション	162
▼5.5.1 計算ケースおよび計算条件	162
▼5.5.2 計算結果と考察	163
5.6 まとめ	183
参考文献	185
第6章 結論	189
6.1 まとめ	189
6.2 今後の課題	192

付録	195
記号表 -----	195
学位論文に関連のある論文リスト -----	199

1.1 はじめに

(水制とは)

水制は代表的な河川構造物で、Fig. 1.1 に示すように一般的には河岸から様々な角度で張り出した形状となっている。川の水を部分的に遮断することによって流れの方向を変え、複雑な3次元乱流を生み出す構造物である。図に示すように、水制工には水制の長さ、高さ、幅、河岸からの張り出し方向の角度、形状と数多くの様々な設計項目があり、また、河岸に1基のみ設置する単独水制や片側や両岸に複数に設置する連続水制の形態があるため、基数と配置間隔も設計項目となる。

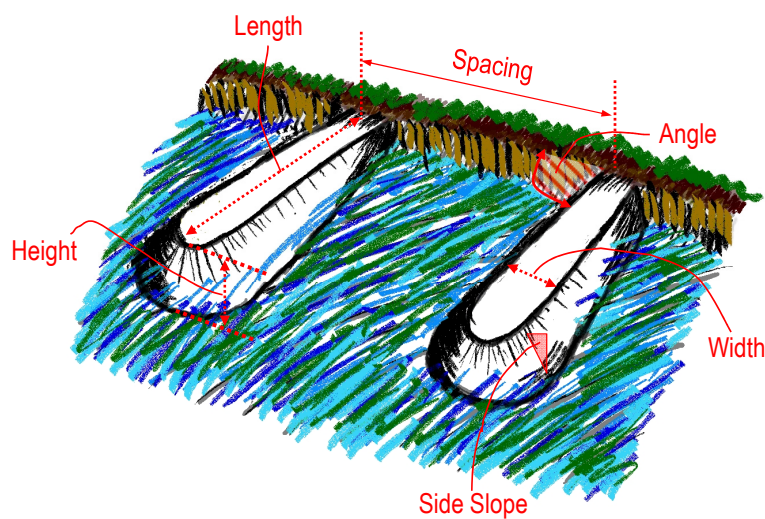


Fig. 1.1 典型的な水制工の模式図

水制の基本的な機能としては、「流速を低下させる」、「水流の方向を変化させる（水刎ね）」の二つである。そして、この二つの機能から得られる様々な効果から、Table 1.1 に示すような河岸侵食対策や航路維持、さらには河川環境向上等の目的で水制工を設置している。このように、設計を工夫すれば様々な目的を達成することから、水制は「水際の魔術師」と呼ばれている¹⁾。

Table 1.1 水制工の設置目的

水制工の設置目的	詳細
・河岸侵食対策や護岸破損対策	流速低減と水刳ね効果を利用して、岸近傍の流速を減少させる。
・航路維持	両岸から水制を張り出し、水路中央部の流速を平水時においても大きくし、土砂の堆積を防いで水深を確保する。 ※浚渫費用(dredging cost)を軽減できる。
・河川環境の向上 (河道の多様性の創出)	水制によって流れに変化を生じさせ、周辺の河床地形にも変化(多様性)を与え、そこから生み出される様々な水深域、流速域で多様な生き物が生息できるような環境をつくり出す。
・河川景観の向上	周辺の景観との調和を考え、材質や色、形を選択し、周辺の景観向上に加え、護岸や堤防の安全性を高める。
・自然豊かな親水域をつくり出す	水制間に土砂を堆積させて土地を得ることや、水制間により流速の低減域を作成することによって、人々によって安全な親水域を提供する。

(日本の水制工に関する歴史)

水制工は、世界各国で古くから実施されてきた河岸処理技術である。日本においては、各時代の背景や社会意識の変化によって影響を受けて発展してきた河川構造物と言える。水制がいつから存在するかは定かではないが、古くは江戸時代元禄2年(1669年)、幕府勘定奉行所役人の平岡道敬によって書かれた地方竹馬集(じかたちくばしゅう)が存在する。その書には役人としての倫理、行政手続き、御所・城壁・堤防などの普請技術、積算基準が書かれており、Fig. 1.2 に示す当時「出し」と呼ばれていた水制の設置に関する留意点が書かれている²⁾。この時代の水制工法は、土や石、木などの地場の素材を用い、経験的に工夫された工法といわれる。

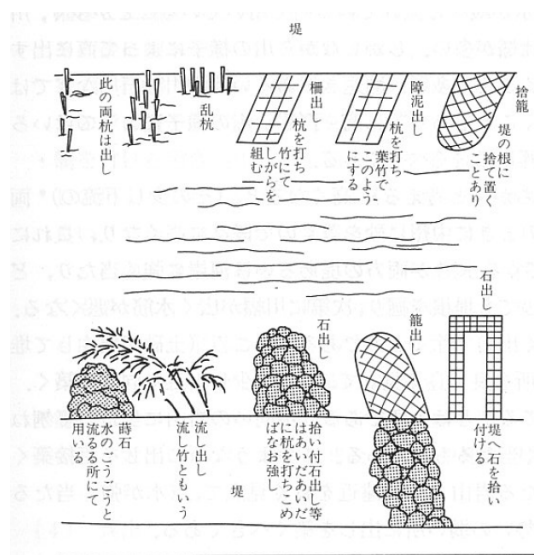


Fig. 1.2 地方竹馬集に描かれた「出し」²⁾

明治時代の日本では、富国強兵、殖産興業政策の背景から、欧米各国の中からキリスト教の宣教をしないという理由で、欧米各国の中からオランダ人を雇い、欧米の治水技術の導入、そして水制による輸送手段の舟運の改善に力を注いだ。当時明治政府が外国人技術者に当時支払った給与は、現在の

月給にすると 240 万円から 400 万円と高額で³⁾、政府の治水への意気込みの高さが感じ取られる時代であった。この時代にオランダ式の水制工が日本に導入された。その後、明治時代中期から、日本の若者に向けた西洋近代科学を土台とした高等技術教育が始まり、欧米技術が日本国内で消化され明治 20 年代頃からは外国人に代わって日本人が科学技術の指導者として本格的に実践し始めた。そして、明治 29 年(1896 年) 4 月には日本最初の河川法が制定され、産業の工業化による国家財産の安定と増大、大水害の経験によって治水事業の声が高くなっている状況にあったため、必然的に日本国内の河川技術者が増大した。

昭和の時代に入り、昭和 10 年頃から日本は戦時体制のため、労働力不足や予算の減少によって治水事業の十分な管理や維持ができない状況が続いた。昭和 30 年に入ると戦後の混乱期も終わったが、舟運のための水制は、鉄道・道路の輸送力や利便性との競争に負け、Fig. 1.3 に示すように昭和 10 年代初めを最後にほとんど見られなくなり、高度成長期からコンクリートによる護岸工法により、水制による護岸は行われなくなった。コンクリートで護岸を固める方が安価で効果がすぐに期待できたこと、そして、河川工事の事業量増大に伴って国の直営工事が終焉し、民間への完全請負となり、河川管理技術の統制化・マニュアル化による技術の標準化が求められたことも原因の一つと言われている。当時、水制工設置は主に経験主義的な設計論であって、水制による流れや河床の変化の現象が複雑なため当時では十分に把握されておらず、流砂環境の地域特性の影響も受けて、構造設計のための技術の標準化が難しかったと考えられる。そのため、水制については基準(案)や構造令において、その他の土木構造物に比べてポジティブな記述となっていないか、もしくは水制に関する記述が少なくなり、河岸処理工法として水制の終焉時代が到来してしまった。しかし、土木技術者の士気は高く、昭和 30 年代に入ると建設省土木研究所を中心として河川水理模型実験の高度化と、水理学的根拠に基づく河道設計法を目指す研究が進んだ。

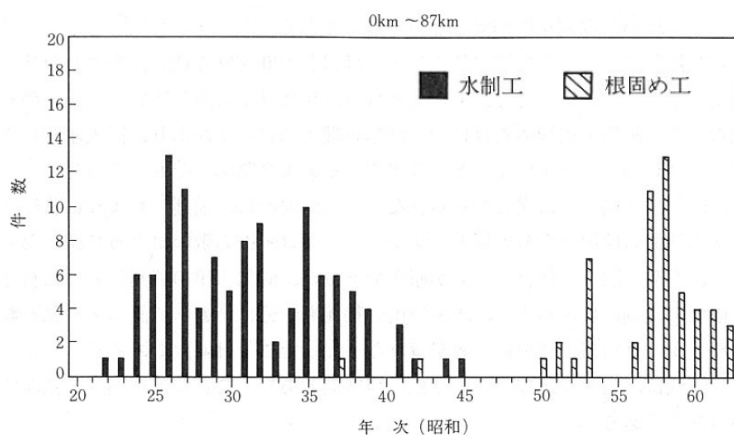


Fig. 1.3 利根川下流部における水衝部対策工事の変遷²⁾

時が過ぎて昭和 30 年～40 年代の高度経済成長を経験し、昭和 40 年代頃から都市問題、公害問題が顕在化し始めた。この頃から国民意識が経済成長第一主義から環境重視の方向へと変化していった。そして、コンクリート製の護岸や根固めは景観面や河川環境面から批判が高まり、1981 年 12 月の河川審議会「河川環境の在り方について」の答申が出され、「治水」・「利水」と並んで「河川環境」が

新たに位置づけられ、水と緑に恵まれた河川環境の良好かつ適切な管理を図ることが強く打ち出された。1990年より多自然型川づくり、河川水辺の国勢調査が始まり、1991年11月には20の指定河川に対して、堰、床止等河川横断施設について、施設とその周辺の改良、魚道の設置・改良、魚道流量の確保等を計画的、試行的に行い、魚道の遡上環境の改善を積極的に行う「魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業」が始まる。そして、1997年には、河川環境の整備と保全を目的に加えた大幅な法改正がなされた。このような状況を経て、環境にやさしくコンクリート護岸より景観的にも優れた水制が再び注目されるようになった。現在では、適切な場所に、適切な形で水制工を設置することにより、生態環境的そして景観的にも望ましい河川環境、河岸付近の流れ場をつくり出すことができると考えられ、研究が進められている。

また、現在では、各地で古来の伝統工法である水制の復元や設置が進められている。Fig. 1.4, Fig. 1.5は長良川忠節橋下流に多数並ぶ、減勢効果や導流効果を期待した工伝統工法の透過性水制「聖牛」の写真である。



Fig. 1.4 長良川忠節橋下流の聖牛
(撮影日：2010年12月27日)



Fig. 1.5 水没した聖牛
(撮影日：2008年7月14日)

山本²⁾は、以下のような水制の開発が望まれると提示している。

(望まれる水制開発)

- ① 河川と水制がつくり出す河道状況が水制設置目的と良く合った水制
- ② 河川と水制がつくり出す河道状況が周辺の風景となじみ合う水制
- ③ 生態系の保全、改善となるような水制
- ④ 河道の変動に応じて補修、修繕が可能な水制
- ⑤ 洪水による水制工の変状に対して復旧、補修が容易な水制
- ⑥ 施工が容易でコストの掛からない水制

これら全ての項目を満たすことは、現在の技術を持ってしてもなかなか容易ではない。④、⑤、⑥については、一度の水制設置でそのまま長期間に亘って手を加えずに①、②、③などの項目を満たし続けることが難しいために付け加えられた項目だと考えられる。日本の河川は流砂環境の変化が大きいこと、そして、水制設置箇所の局所的な領域において長期的な流砂環境の変化を精度良く予測することが現在においても難しいために、設計時点で補修と修繕が可能な柔軟な水制工法を考える必要があることを意味している。今後の水制開発において、少なくとも①、③の項目については、実験的研究、現地調査もしくは数値解析を用いたさらなる研究を進め、高確率で上記の項目を満たし、そしてその環境が長期間に亘って維持されるような技術確立しなければならないと考えられる。

これまで経験的に設置された水制の中には、現在の知識を持って考えると合理性に欠けるものも多く、十分な効果を得られずに失敗に終わっている例も少なくないが、次に記述する愛知県矢作川上流44km 辺りに設置された水制は、現在においては上記の項目の多くを満たしていると考えられる。

(矢作川古鼠(ふっそ)水辺公園)

Fig. 1.6 に愛知県豊田市扶桑町の矢作川古鼠水辺公園の写真を示す。「古鼠」は現在の地名「扶桑町」の旧地名で「古鼠」は旧地名の略字である。この場所はお釣土場として 2007 年度に土木学会デザイン賞優秀賞を受賞している。整備される以前のこの河畔は、竹林が生い茂り、水辺に人も近寄れぬ状況であったが、現在では公園と水制がつくり出した親水域が一体化した景観的にも素晴らしい場所となっている。

矢作川上流には7つのダム、水辺公園直上流45km 地点には越戸ダムがあり、この河畔はダムに比較的近く、流量の減少で流砂量が減少し、河床低下や固化といった問題が発生していた。そして、カワシオグサのような特定の生物が大発生し、魚類の生息環境を悪化させ、河川環境および生態系のバランスを崩していた。そのような河川環境下で、平成4年5月から生態学、工学、社会学の研究者たちが地元住民、行政、民間企業の土木技術者らと一体となって取り組んだ通称「古鼠プロジェクト」⁶⁾が行われた。1950年代頃のアユ釣りが盛んであった矢作川を再生の具体的な目標とし、「川のダイナミズム」の再生、そして、失われた矢作川の原風景を取り戻すプロジェクトが進められた。平成3年に、試験的に自然石を用いた石積み水制(Fig. 1.7)を片側に1基設置し、平成4年に8基、現在までに計11基の水制を施工し、鬱蒼としていた竹の伐採を行い⁷⁾、高木層にエノキ、ムクノキを生育している。その結果、現在では豊かで重層的な樹林と水辺の親水空間(Fig. 1.8)が再生され、Fig. 1.9のように筏下りが開催されるような場所にもなり、水辺の愛護団体が形成されるまでに至っている。

また、矢作川天然アユ調査会と豊田市矢作川研究所が協働で行った調査⁸⁾では 35km に位置する明治用水頭首工のアユ遡上数が、年毎にばらつきはあるが増加傾向を示し、今ではアユ釣り大会も例年開催されるまでになり、川の生態系のバランスも改善されたと言える。平成 12 年の東海豪雨によって水制 2 基が破損したが、石積み構造であるため補修が容易で、現在ではすでに復旧している。以上より矢作川の古鼠水辺公園は、山本の提示した①～⑥の全ての項目を満たした理想的な水制開発によって河川環境改善がなされた地域であると言える。



Fig. 1.6 矢作川の古鼠水辺公園
(撮影日：2010 年 12 月 6 日)



Fig. 1.7 古鼠水辺公園の石積み水制
(撮影日：2010 年 12 月 6 日)



Fig. 1.8 石積み水制と公園の一体化
(撮影日：2010年12月6日)



Fig. 1.9 水制が作り出した親水域で筏下りをする風景（古川水辺公園）
(<http://www.jsce.or.jp/committee/lsd/prize/2007/works/2007n3.html>)

1.2 本研究の目的

上述したように、水制工は社会要望の変化に応じて、洗掘防止目的の護岸対策や航路確保の目的だけでなく、生態系や河川景観の再生や保全の手法として注目され、近年では環境を意識した施工計画やその研究が精力的に行われている。詳細な既往研究のレビューについては次章に記述するが、近年の日本国内においては、例えば清水ら⁴⁾や福留ら⁵⁾の研究では実河川に水制を試験的に設置した実験的研究が行われており、水制設置により積極的に河床の洗掘・堆積を生じさせることで瀬や淵の復元を行っている。

これまで水工学分野において、水制を代表とする河川構造物周辺の流れ構造、洗掘機構の解明および洗掘深予測についての実験的研究が世界各国で盛んに行われてきた。また、水制を設計する上で水制長、水制タイプ、配置、角度、基数と設計項目は数多くあり、検討すべき設計項目の組み合わせも多数となるため、人的な労力の削減が可能なことから数値解析が設計する上での有力な手段として、1990年代からこれまで精力的に研究が進められている。

これまでの水制周辺の局所洗掘に着目した移動床実験は、現象を単純化できることから粒径の様な均一砂河床を用いた実験が多く、混合砂を用いた移動床実験の研究事例はそれほど多くない。また数値解析においては、水制周辺の3次元的な複雑な流れ場だけでなく河床変動まで十分な精度で計算ができるようになってから、まだ時間はそれほど経っておらず、水制周辺において混合粒径を計算し粒度分布の変化を捉え、実験の再現やその精度検証まで行っている研究事例はまだない。そのため、河床材料の粒度分布の違いが水制周辺の河床形状にどのような違いをもたらすのか、そして水制が河床表層の粒度分布にどのような変化をもたらすのかについては明らかになっていない部分が多く残されている。さらには数値解析モデルを用いた研究が次ステージに進むためにも、さらなる混合砂を用いた移動床実験を行いデータの蓄積が望まれている。河床材料の粒度分布は河川を構成する重要な要素であり、流れに対する河床の安定性だけでなく、植生や魚など水生動植物の生息域、魚の産卵床などに影響を与えるため、生態系などの環境を意識した水制施工計画を行うためには、さらなる混合砂河床における粒度分布を意識した水制に関する研究が必要だと考える。

そこで本研究では、均一砂および混合砂河床を用いた越流および非越流の不透過型水制1基周辺の局所洗掘に関する移動床実験を行い、河床の粒度分布が水制周辺の局所洗掘に及ぼす影響と、水制が周囲の粒度分布変化に与える影響を解明することを目的とした。さらには、それらの混合砂の移動床実験のデータを用いて、水制周辺の局所洗掘の形状だけではなく粒度変化まで予測可能な数値解析モデルの構築を目指す。

本研究により、水制がもたらす河床粒度変化について少しでも理解が進み、今後、現地の河川環境に適した水制設計および設置の一助となれば幸いである。

1.3 本論文の構成

Fig. 1.10 に本論文の構成をフローチャートで示す。

まず第1章では、本研究の背景と目的、そして本論文の構成を示している。

第2章では、水制に関する既往研究のレビューを実験的研究と数値解析的研究に分けて行い、これまでの研究で明らかになっていること、そして今後の研究として残されて現在求められている課題と、本研究の位置付けについて記述した。

第3章では、混合砂河床を用いた非越流型直角水制の移動床実験を行い、初期河床粒度が水制周辺の局所洗掘に与える影響を考察し、平坦河床と洗掘河床における水制周辺の3次元的な流れ場を計測して、水制周辺の3次元的な渦構造を把握し、その渦構造がもたらす表層の河床粒度変化について考察を行った。

第4章では、水制の越流状態が洗掘および粒度変化に与える影響に着目するために、均一砂および混合砂河床の移動床実験を行い考察した。そして、水制高の異なる越流型水制周辺の3次元流れ場を計測し、水制高の違いがもたらす流れ場の変化と、その洗掘と粒度変化にもたらす影響について考察した。

第5章では、水制周辺の局所洗掘および粒度分布を精度よく予測することが可能な数値解析モデルの構築を目指し、非構造格子を採用した3次元 RANS モデルと混合粒径の非平衡流砂モデルで構成される河床変動モデルを構築し、第3章と第4章で得られた実験結果を用いて計算モデルで得られた結果の精度検証を行った。

最後に、第6章では、第5章までに得られた成果をまとめるとともに、今後取り組むべき課題について論じる。

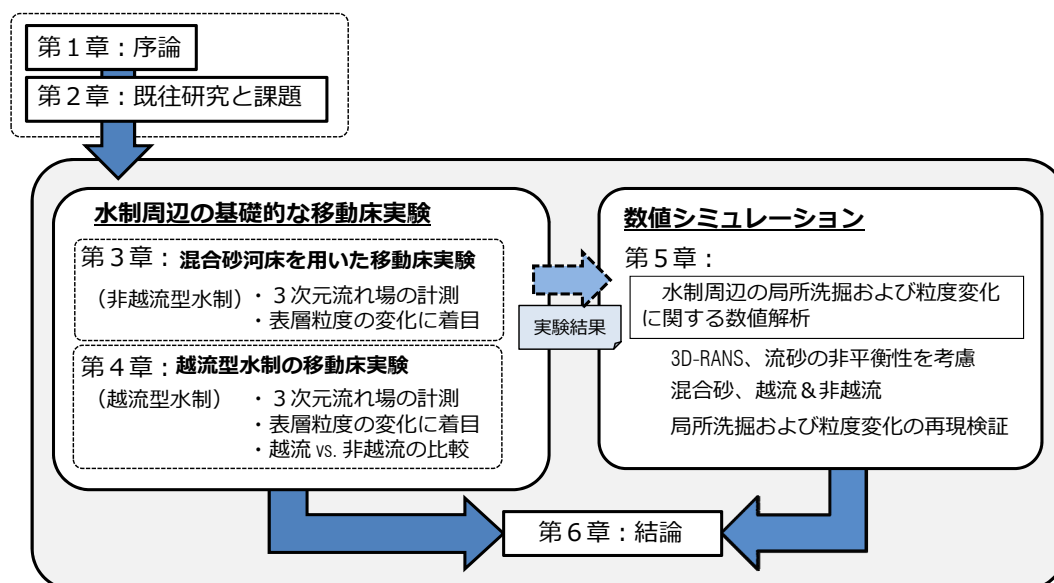


Fig. 1.10 本論文の構成

参考文献

- 1) 土木学会関西支部編 (1998)：川のなんでも小辞典～川をめぐる自然・生活・技術，講談社ブルーバックス.
- 2) 山本晃一 (1996)：日本の水制，山海道.
- 3) 上林好之 (1999)：日本の川を甦らせた技師デ・レイケ，草思社.
- 4) 清水義彦・小葉竹重機・小林俊雄・長田健吾・中村佳央・宮前太一 (2004)：山地河川における瀬淵復元のための実験工事とその効果予測，河川技術論文集，第10巻，pp.411-416.
- 5) 福留脩文・藤田真二・福岡捷二 (2010)：瀬環境を回復した低水路水制の設計とその環境機能の評価，水工学論文集，第54巻，pp.1267-1272.
- 6) 新見幾男 (1998)：続・よく利用され なお美しい矢作川の創造をめざして－近自然工法による水辺林整備と神の領域－，矢作川研究，No.2，pp. 1-4.
- 7) 中坪孝之・洲崎燈子 (1998)：矢作川の植生とその管理に関する研究，矢作川研究，No.2，pp. 113-127.
- 8) 山本敏哉・永友昌秀 (2010)：明治用水頭首工におけるアユの遡上データ（1998～2009年），矢作川研究，No.14，pp.73-76.

第2章

水制周辺の流れ及び河床変化に関する既往研究

2.1 概説

これまでの水制に関する研究は、水理模型実験による研究方法、そして、計算機の発達に伴い 1990 年頃から始まった数値シミュレーションを用いた方法、また現地調査により実際に現地河川の水制設置地点を調査する方法に大別される。現地調査による研究については、現地河川の現象の複雑性と、計測の難しさや労力と費用の面、そして河川管理の上で現地河川に簡単には水制を設置することができないため、国内の研究数としては少ない。多くは実験水路を用いたもので、1990 年以降では数値実験による水制に関する研究が増えている。本章においては、これまでの水制に関する研究において、実験水路を用いた既往研究、そして数値解析法による研究を整理し、本研究で行う実験および数値解析の位置付けを明確にする。

2.2 実験水路を用いた既往研究

実際の河川の流れは複雑で理論的解明が難しいことが多く、実験水路を用いて各種特性量を計測することによって現象理解を深める実験的アプローチは王道で、今や常套手段となっている。実験では実際に現象を目視で確認できることや、数値予測技術で未だ予測不可能な部分に対しては、実験的アプローチは重要な役割を果たし、また数値シミュレーションによって現象をモデル化する際に必要な検証データも実験によって得ることができる。

水制は河床の洗掘や堆積の平面的な変化をもたらす、その変化が人間にとって利益をもたらすか、もしくは災害等の損害をもたらすかは、その洗掘現象を十分に理解し予測できているかにかかっている。その水制がもたらす流れの変化と河床の洗掘現象を理解するために、古くからたくさんの実験的研究が行われ、国内においては 1960 年頃から盛んに行われてきた。水制は、構造物の透過性、形状、設置角度、そして越流状態によって様々な種類に分類され (Table 2.1), Fig. 1.1 に示したように多くの設計項目が存在する。かつては様々な形状の水制工を実際に河川に設置し、経験的にその水制工の構造や形状、配置形態などの効果や特徴を理解してきたが、時代が進み、河川管理の上で容易には実河川に水制工を設置できない状況になったことや、模型実験の高度化によって、各水制タイプの流れ

や洗掘現象について実験用水路を用いて研究するようになった。Table 2.2 には水制に関する流れや河床洗掘に関する実験水路を用いた代表的な研究を发表年順に並べ、実験で対象としている水制タイプ、実験条件、計測項目、研究の着眼点について整理している。

Table 2.1 水制の分類

項目	分類
構造(透過性)	不透過型, 透過型
形状	直線型, L型, T型 等
配置角度	直角型 (Deflecting), 斜め型 (上向き (Repelling), 下向き (Attracting))
越流状態	非越流型, 越流型
基数	単独型, 連続型
配置形態	片岸側, 両岸側

Table 2.2 水制周辺の流れおよび洗掘に関する実験的研究

年	著者	水制タイプ	水路形状	河床形状	河床砂	計測項目	研究の着眼点
1959	椿 ¹⁾	・非越流/越流 ・不透過 ・1基(単独水制) ・90°	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速 (プロペラ型流速計&ピトー管)	・非越流型水制背後の水平渦領域の形状 ・越流水制による主流及び側壁流速の変化
1962 1964	栗津 ^{2) 3) 4)}	・非越流/越流 ・不透過 ・1基 ・90°	直線	平坦河床 (固定床) 移動床	不明	・洗掘範囲 ・	・洗掘範囲 ・洗掘発生限界
1966	土屋・石崎 ⁵⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・90°	直線		均一砂	・河床高 ・流速 (プロペラ)	・洗掘孔形状, 河床勾配 ・洗掘による流線の変化 ・洗掘深の推定
1968	土屋・石崎・丸山 ⁶⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・90°	直線	移動床	均一砂	・河床高 ・流速(プロペラ) ・流線 ・水位	・洗掘形状 ・移動床における剥離域の大きさ
1969	椿・田原 ⁷⁾	・非越流 ・不透過 ・Series(数不明) ・90°	直線	移動床	均一砂	・河床高	・連続水制による河床変動 ・水制先端および水制域内の洗掘と堆積
1972	中崎・玉井 ⁸⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・Deflecting/ Repelling/ Attracting	直線	移動床	均一砂	・河床高	・設置角度と洗掘の関係 ・フルード数と洗掘孔の関係
1992	道上・檜谷 ⁹⁾	・非越流 ・不透過 ・1基	直線	移動床	均一砂	・河床高 ・流速(EMV)	・平衡河床 ・3次元局所流れ
1994	富永・劉・三尾・大橋 ¹⁰⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・ $\theta = 45, 60, 135$	直線	平坦河床 (固定床)	—	・水位 ・流速(EMV)	・水位 ・設置角度の異なる水制背後の流れ
1996	陳・池田 ¹¹⁾	・非越流 ・不透過 ・1基/2基	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(EMV) ・水位	・水制背後の剥離渦 ・再付着点位置 ・水制域境界での物質および運動量交換
1997	Melville ^{12) 13) 14) 15)}	・非越流 ・不透過 ・複数の設置角 ・橋脚/鉛直壁…	直線	移動床	均一砂 混合砂	・河床高	・膨大な実験データに基づく洗掘深予測式の提案
1998	福岡・西村・岡信・川口 ¹⁶⁾	・越流 ・不透過 ・Series(15,20) ・Deflecting/ Repelling/	直線	移動床	均一砂	・河床高 ・流速(EMV)	・単独ではなく水制群の実験 ・配置間隔, 角度の影響

Table 2.2 (continued.)

年	著者	水制タイプ	水路形状	河床形状	河床砂	計測項目	研究の着眼点
1999	池田・吉池・杉本 ¹⁷⁾	・非越流 ・不透過 ・Series(5~15)	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速 (EMV&ADV) ・水位(容量式波高計)	・水制間隔の違いが水制域と主流域間の運動量交換へ与える影響
2000	ELAWADY・道上・檜谷 ¹⁸⁾	・越流 ・1基 ・Deflecting/ Repelling/ Attracting	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流れ(ADV) ・水位(point gage)	・越流型水制周辺の流れ場
2001	ELAWADY・道上・檜谷 ¹⁹⁾	・越流 ・1基 ・90°	直線	移動床	均一砂 (1)	・河床高	・開度と洗掘の関係 ・水制長さ・水深と洗掘の関係
2001	ELAWADY・Michiue・Hinokidani ²⁰⁾	・越流 ・1基 ・60° (Repelling)	直線	移動床	均一砂 (1)	・河床高	・開度と洗掘の関係 ・水制長さ・水深と洗掘の関係
2001	ELAWADY・Michiue・Hinokidani ²¹⁾	・越流 ・1基 ・120° (Attracting)	直線	移動床	均一砂 (1)	・河床高	・開度と洗掘の関係 ・水制長さ・水深と洗掘の関係
2000	富永・中野・藤田 ²²⁾	・越流 ・2基 ・90°	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV)	・PIV計測により越流水制間の流れの3次元構造把握
2000	富永・井嶋・中野・井嶋・長坂 ²³⁾	・越流 ・2基 ・Deflecting/ Repelling/ Attracting	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV)	・PIV計測により斜め越流型水制周辺の流れの3次元構造把握
2001	富永・井嶋・中野 ²⁴⁾	・越流 ・2基 ・Deflecting/ Repelling/ Attracting	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV)	・PIV計測により斜め越流型水制周辺の流れの3次元構造把握
2002	富永・井嶋 ²⁵⁾	・越流 ・2基 ・Deflecting	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV)	・相対水制高が1対の水制間の流れに与える影響
2004	富永・田本 ²⁶⁾	・越流 ・不透過 ・連続水制(10基)	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV)	・水制の設置角度
2005	Rahman・Nakagawa・Khaleduzzaman・Ishigaki ^{27) 28)}	・非越流 ・Bandal-like structures ・Series	直線	移動床	均一砂	・河床高 ・流速(EMV)	・バンダル型水制がもたらす河床変化 ・簡易的な洗掘深予測式
2005	Yeo・Kang・Kim ²⁹⁾	・非越流 ・透過/不透過 ・1基 ・90°	直線	平坦河床 (固定床)	—	・流速(PIV,ADV)	・水制先端流速と接近流速の関係 ・透過型水制背後の逆流域の予測式
2007	Ezzeldin・Saafan・Rageh・Nejm ³⁰⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・ $\theta = 30, 60, 90$	直線	移動床	混合砂 (1)	・河床高	・水制設置角度の影響 ・洗掘深予測式
2008	Nasrollahi・Ghodsian・Neyshabouri ³¹⁾	・非越流 ・1基 ・90 ・不透過/透過	直線	移動床	均一砂	・河床高	・透過水制の透過率の影響 ・洗掘深予測式
2009	Duan・Fu・Wang ³²⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・90°	直線	平坦河床 /洗掘河床	混合砂 (1)	・流速(ADV)	・平坦河床と洗掘河床の流れ場比較
2009	Vaghefi・Ghodsian・Neyshabouri ³³⁾	・非越流 ・不透過 ・T型 ・1基 ・Deflecting	湾曲 90°	移動床	均一砂	・河床高 ・色素注入による流れ場観察	・T型水制の長さが洗掘深および洗掘量に与える影響 ・T型水制周辺の最大洗掘地点の位置

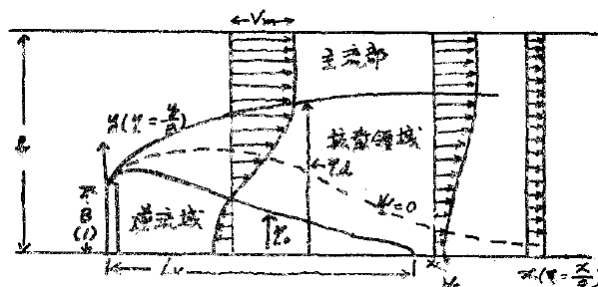
Table 2.2 (continued.)

年	著者	水制タイプ	水路形状	河床形状	河床砂	計測項目	研究の着眼点
2009	Zhang Nagawaga Kawaike Baba ³⁴⁾	・非越流 ・1基 ・不透過 ・90°	直線	移動床	均一砂	・流速(EMV,PIV)	・洗掘河床上の水制周辺の流れ場
2010	鈴木・門田・ 重松・田中 ³⁵⁾	・非越流 ・I&T&L型 ・1基 ・不透過	直線	移動床	均一砂	・河床高(自動計測)	・各種水制形状の局所洗掘と堆積形状
2010	Masjedi Dehkordi Alinejadi Taeedi ³⁶⁾	・非越流 ・T型 ・1基 ・不透過	湾曲 180°	移動床	均一砂	・河床高	・T型水制の形状と局所洗掘 ・湾曲部の設置位置 ・洗掘深予測式

Table 2.2 に挙げた研究は、似たような水制タイプの実験条件であっても研究の目的や着眼点、年代による実験器具の発展による計測精度も異なり、また研究の目的が同じであっても対象としている水制タイプや形態が異なっており、それぞれ大変貴重な成果が得られている、ここでは、これまでの水制に関する実験的研究の主な成果を順に記述する。

(水制背後の剥離渦の構造)

水刎ね効果によって水制先端から側壁反対側へ流れが偏向し、水制背後には流れが緩やかな死水域が形成され、土砂堆積を促し堤防護岸への負担を減らし安全を計ることが以前から考えられており、その剥離域の大きさを把握する研究が古くから進められていた。

Fig. 2.1 平坦河床上流れの模式図(椿¹⁾)

椿¹⁾は、Fig. 2.1 に示すように平坦河床における非越流型水制背後の水平渦による逆流域(recirculation zone)の大きさについて着目しており、その水制によって曲げられた流れが再び側壁に近づく地点(再付着点; reattachment point)は、流れが常流の場合は水制設置位置から水制長の8倍から16.5倍(8L~16.5L)下流に行った位置にあることをプロペラ形流速計とピトー管の計測により示している。また、陳・池田¹¹⁾は、同じく平坦河床の実験で電磁流速計を用いて計測を行い、水制背後の水平渦の中心が6Lの位置に位置することと、再付着点の位置は11L~17Lの範囲内で時間的に変化し、再付着点の平均位置は14Lの位置であること、また、流入条件を変化させてもその平均位置は変化しないことを示した。また、水平剥離渦の発生周期や伝播速度などを詳細に計測し、水制先端から放出された水平渦

は、断面平均流速よりわずかに大きい流速で流下し、その速度は流下方向には変化しないことを示している。Ouillon・Dartu³⁸⁾らも、同じような実験と3次元流れの数値計算を実施しており、実験では再付着点位置が11.5L、数値計算では10.7Lと概ね再現されている。

また、Yeo ら²⁹⁾は透過型水制の逆流領域について着目し、超音波式流速計（ADV, Acoustic Doppler Velocimeter）と PIV 法により再付着点までの距離を計測しており、透過性が高くなると再付着点がより水制に近くなること明らかにし、実験結果より以下の式を提案している。

$$L^* = \frac{L_{re}}{L_s} = 12.616 \times K_\alpha \times K_p \times F_r^{0.0323} \quad (2.1)$$

ここで、 L_{re} はそれぞれ水制位置から下流の再付着点までの逆流領域の縦断方向の大きさ、 L_s は水制の長さ、 F_r は接近流速のフルード数、 K_α は水制設置角度の係数（今のとこと直角型水制のみ検討しているため 1.0 としている）、 K_p は水制の透過率による係数を表す。 K_p については、不透過の場合は 1.0、透過型については透過率を 20%、40%、60%、80% に変えた実験より次式を得ている。

$$K_p = -0.14 \times X + 12.066 \quad (0\% < X \leq 80\%) \quad (2.2)$$

この式については、フルード数が 0.2 から 0.35 程度の範囲では実験値とよく一致していると考えられるが、その他の範囲については他者の実験値とは差が生じているため更なる検討が必要である。また、Ho ら³⁹⁾は流れの3次元数値解析により、この式で得られる逆流領域の大きさが計算結果と概ね一致していることを示している。

上記した実験によって得られた水制背後の逆流渦による再付着点の位置は、平坦河床の実験によって得られた成果であり、実河川においては水制先端部で洗掘が生じていることが多く、この洗掘した状況下ではこの成果を適用できなくなる。土屋ら⁶⁾の実験では、洗掘河床では平坦河床で得られた逆流領域の6分の1程度に減少することを示しており、また、Zhang ら³⁴⁾の実験では、洗掘河床の水制周辺の代表的な断面について流速場を計測し、洗掘河床においてはより複雑な3次元渦構造が存在することを示し、洗掘状況によって水制背後の逆流領域が大きく異なる結果となっている。

（最大洗掘深予測式）

水制周りには洗掘が生じ、その洗掘が水制自体や護岸の破損の原因となるため、その洗掘がどの程度まで進むのかを設計の段階で知っておく必要がある。水制周辺の洗掘は、基本的に次に示す要因に影響されると考えられる。

$$e_m = f(g, d, \sigma_g, h, U, L_s, H_s, W_s, \theta_s) \quad (2.3)$$

ここで、 e_m は洗掘孔内の最大洗掘深、 g は重力加速度、 d は河床材料の粒径、 σ_g は河床材料の幾何標準偏差、 h は水深、 U は平均流速、 L_s は水制の長さ、 H_s は水制の高さ、 W_s 水制幅、 θ_s 水制の設置角度を表す（水深および平均流速は、水制の影響のない接近流れの値を示す）。これを次元解析の手法によって無次元関係に表すと、

$$\frac{e_m}{h} = f\left(\frac{U^2}{gd}, \frac{d}{h}, \sigma_g, \frac{L_s}{h}, \frac{H_s}{h}, \frac{W_s}{h}, \theta_s\right) \quad (2.4)$$

これらの関係式は、実験もしくは現地河川で生じている洗掘の情報を用いて定式化されている。これまでにたくさんの洗掘深予測式が作成されてきたが、Melville ら^{12) 13) 14) 15)}が作成した次式は膨大な実験データに基づいており、最も有名で様々な文献で引用されている。

<Melville らの最大洗掘深予測式>

$$e_m = K_{hL} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_S \cdot K_\theta \cdot K_G \quad (2.5)$$

ここで、 K は上式(2.4)の各要素を表すパラメータで、 K_{hL} は水深と構造物の長さの影響を表すパラメータ、 K_I は流れの強さを表すパラメータ、 K_d は河床材料の粒径の影響を表すパラメータ、 K_S は構造物の形状を表すパラメータ、 K_θ は設置角度の影響を表すパラメータ、 K_G は水路断面形状の影響を表すパラメータである。

$$K_{hL} = \begin{cases} 2L_s & , (L_s/h < 1) \\ 2\sqrt{hL_s} & , (1 < L_s/h < 25) \\ 10h & , (25 < L_s/h) \end{cases} \quad (2.6)$$

$$K_I = \begin{cases} 1.0 & , \left(1 \leq \frac{U - (U_a - U_c)}{u_c}\right) \\ \frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} & , \left(\frac{U - (U_a - U_c)}{U_c} < 1\right) \end{cases} \quad (2.7)$$

ここで、 U_c, U_{ca} は粒径 d とアーマ・コートの中央粒径 d_a の限界流速を表し、次の対数則より求められる。

$$\frac{U_c}{U_{*c}} = 5.75 \log\left(5.53 \frac{h}{d}\right), \quad \frac{U_{ca}}{U_{*ca}} = 5.75 \log\left(5.53 \frac{h}{d_a}\right) \quad (2.8)$$

U_c, U_{ca} は粒径 d と d_a の限界摩擦速度で Shields diagram 等で求め、 d_a については Chin ら⁴⁰⁾によって次式が提案されている。

$$d_a = d_{\max} / 1.8 \quad (2.9)$$

次に河床材料の粒径に関するパラメータを次に示す。

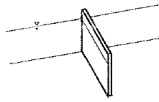
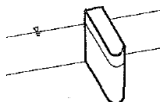
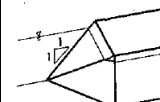
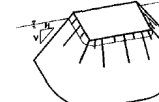
$$K_d = \begin{cases} 1.0 & , \left(25 < \frac{L_s}{d}\right) \\ 0.57 \log(2.24 L_s / d) & , \left(\frac{L_s}{d} \leq 25\right) \end{cases} \quad (2.10)$$

ここで混合砂の場合は d の代わりに d_a を用いる。

K_S については、基本的には Table 2.3 の値を用いる。また、水深に対して構造物の長さが長くなると K_S の影響が重要ではなくなり、次式のような L_s/h で場合分けした K_S^* が提案されている。

$$K_S^* = \begin{cases} K_S & , (L_s/h \leq 10) \\ K_S + 0.667(1 - K_S) \left(\frac{L_s}{10h} - 1 \right) & , (10 < L_s/h < 25) \\ 1.0 & , (25 \leq L_s/h) \end{cases} \quad (2.11)$$

Table 2.3 形状パラメータ K_S ¹³⁾

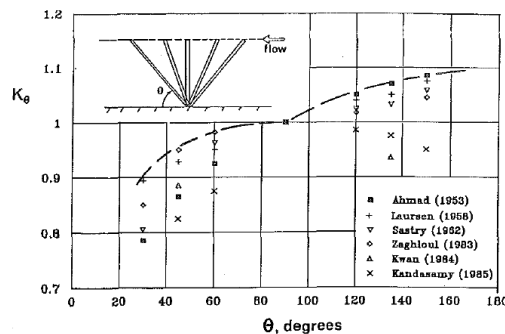
形状				
K_S	1.00	0.75	0.75	0.5:1.0 0.60 1.0:1.0 0.50 1.5:1.0 0.45

K_θ は設置角度の影響を表すパラメータで、下流向きは洗掘深が小さくなり、上流向きは洗掘深が大きくなる傾向をこのパラメータで表現している。基本的な値を Table 2.4 に示し、その基となった資料を Fig. 1.1 に示す。そして水制形状と同様に設置角度についても水深に対して構造物の長さが長くなると最大洗掘深への影響が重要ではなくなるため、次式が提案されている。

$$K_\theta^* = \begin{cases} K_\theta & , (L_s/h \leq 10) \\ K_\theta + (1 - K_\theta) \left(1.5 - \frac{L_s}{2h} \right) & , (10 < L_s/h < 25) \\ 1.0 & , (25 \leq L_s/h) \end{cases} \quad (2.12)$$

Table 2.4 設置角度パラメータ K_θ

θ (degree)	30	60	90	120	150
K_θ	0.90	0.97	1.00	1.06	1.08

Fig. 2.2 設置角度パラメータのための実験結果¹³⁾

最後のパラメータ $K_G^{14)}$ については、複断面の場合の水路形状を表すパラメータで次式より与えられる。

$$K_G = \sqrt{1 - \frac{B^*}{B} \left[1 - \left(\frac{h}{h^*} \right)^{5/3} \frac{n}{n^*} \right]} \quad (2.13)$$

ここで、 B は水路幅、 n はマンニングの粗度係数を表し、上付き(*)は高水敷上の値であることを示している。以上より、全てのパラメータ K を用いて最大洗掘深が簡単に予測できるが、この式は構造物設計で用いられることを考えて、パラメータの導出過程において、洗掘深が大きく出ている実験結果に合うように安全側にチューニングされているため、この式から得られる最大洗掘深は実際より若干大きめの値を示すことが多いと考えられる。

<透過型水制の最大洗掘深予測式>

Nasrollahi ら³¹⁾は透過型と不透過型水制の移動床実験を行い、Melville らの式を基本とし、透過型水制にも適用可能な最大洗掘深予測式を提案している。

$$e_m = K_{hL} \cdot K_I \cdot K_d \cdot K_S \cdot K_\theta \cdot K_G \cdot K_R \cdot K_n \quad (2.14)$$

K_R と K_n の二つが Nasrollahi らによって提案されたパラメータで、 K_R が透過型水制の透過率を表すパラメータ、 K_n は相対水制幅 L_s/B と最大洗掘深の関係を表すパラメータである。その他の各種パラメータについては、論文内では実験条件から $K_I = 1$ 、 $K_d = 1$ 、 $K_S = 1$ 、 $K_\theta = 1$ 、 $K_G = 1$ となっている。 K_R については、透過率 R の関数で次式より与えられる。

$$K_R = 0.96(1 - R)^2 \quad (2.15)$$

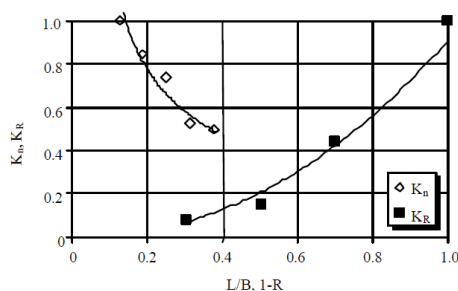
$$R = \frac{x}{x + D_p} \quad (2.16)$$

ここで、 x は杭間の距離、 D_p は透過水制を構成する杭の直径を表す。透過率が大きくなれば洗掘深が大幅に軽減される効果を K_R で考慮する。

K_n については、次式より与えられる。

$$K_n = 0.34 \left(\frac{L_s}{B} \right)^{-0.5} \quad (2.17)$$

なお、 K_R および K_n については、Fig. 2.3 に示す実験結果との関係から作られている。

Fig. 2.3 K_R と K_n パラメータ³¹⁾

また，論文内において水深と構造物の長さの影響を表すパラメータ K_{hL} については，実験結果で Melville らの式を調整し次式を提示している。

$$K_{hL*} = 1.325\sqrt{hL_s}, \text{ for } (1 < L_s/h < 25) \quad (2.18)$$

最終的には次式を提示し様々な実験結果と比較し概ね良好な結果を示している。

$$\frac{e_m}{L_s} = 0.51 \left(\frac{h}{L_s} \right)^{0.5} \left(\frac{L_s}{B} \right)^{-0.5} (1-R)^2 K_{hL*} \quad (2.19)$$

<斜め型水制の最大洗掘深予測式>

Ezzeldin ら³⁰⁾は非越流の斜め型水制の移動床実験を行い，どの設置角および相対水制幅 L_s/B においても最大洗掘深がフルード数 F_r と線形関係にあることから，Melville の式と異なりフルード数の関数として最大洗掘深予測式と洗掘孔の大きさの予測式を提示し，水制設置角度と相対水制幅の影響を係数を導入することによって考慮している。

$$\frac{e_m}{h} = C_\theta \cdot C_e (6.142F_r - 0.941) \quad (2.20)$$

$$\frac{L_{up}}{h} = C_\theta (12.2 \cdot C_e \cdot F_r - 1.4) \quad (2.21)$$

$$\frac{L_{down}}{h} = C_e (21.274 \cdot F_r - 2.263) \quad (2.22)$$

ここで， e_m は洗掘孔内の最大洗掘深， h は水深， F_r はフルード数， L_{up} は水制上流側の洗掘幅， L_{down} は水制下流側の洗掘幅， C_θ, C_e は水制設置角度および相対水制幅の係数（Table 2.5）を表す。

Table 2.5 水制設置角と相対水制幅のパラメータ (C_θ, C_e)

	C_θ			C_e		
	90°	60°	30°	0.25	0.175	0.1
式(2.20)	1.0	0.97	0.83	1.0	0.77	0.5
式(2.21)	1.0	0.98	0.70	1.0	0.89	0.71
式(2.22)	—	—	—	1.0	0.85	0.5

(越流型水制に関する研究)

越流型水制周辺の流れは、主流域、水制上部水制域内の流体の作用で3次元的な複雑な流れ構造となっており、それに伴って河床変化についても複雑化され、これまで様々な研究者がその現象の把握に努めている。

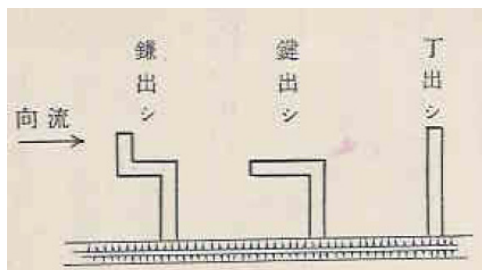
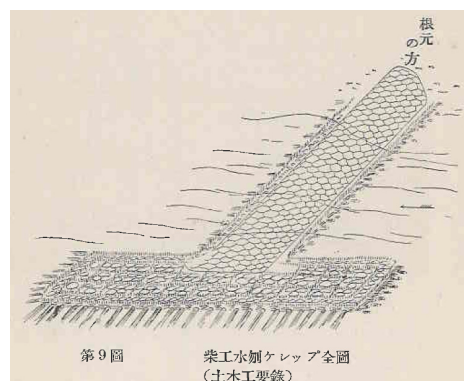
富永ら^{10) 22) 23) 24) 25) 26)}は平坦河床上の越流型水制の流れ構造に着目して、水制の高さ、設置角度、設置間隔をパラメータとして電磁流速計とPIV計測²²⁾を行い、複雑な3次元の流れ場を示してきた。越流型水制では水制間の逆流は、相対水制高が高くなるにつれて強くなることを示し²³⁾、設置角度の違いで水制間領域の流れの構造が全く異なること²⁴⁾、2基の水制間隔を変化させた実験により、水制間隔が大きい場合は水制間の渦構造が不安定となり瞬間の渦構造が時間的に変化するが、時間平均した流れの構造は、水制間隔の変化の影響を受けず設置角度特有の渦構造を持つことを示し²⁵⁾、10基の連続水制群の実験により、平衡領域の水制間においては設置角度の違いで流れの構造に大きな差は見られないことを示した²⁶⁾。

Elawady ら^{18) 19) 20) 21)}は越流型水制の局所洗掘に着目し、無次元掃流力を固定して、水制の長さ及び高さ、そして水深を変化させた移動床実験を行い、最大洗掘深と水制の長さ、高さ、そして水深の関係について考察を行っている。Elawady らは直角水制 (Deflecting) の実験¹⁹⁾だけでなく、側壁に斜めに設置された斜め型水制がもたらす河床変化に着目し、水制設置角 120° (Repelling)²⁰⁾ および 60°

(Attracting)²¹⁾の同様の実験を行い比較している。直角型水制実験により、Opening ratio と Overtopping ratio が大きいほど最大洗掘が小さくなる傾向、また、水制長が長く水深が小さい方が最大洗掘深および洗掘幅が大きくなる傾向を示した。斜め型水制の実験では、水制高が低い場合は Opening ratio が大きくなれば最大洗掘深が小さくなる傾向が顕著に表れるが、水制が高いケースについては Opening ratio が大きくなっても最大洗掘深にほとんど影響がないことが示された。また、水制長が長いほど最大洗掘深が大きくなる傾向は斜め型水制においても見られ、設置角 120° の方がその影響が強いことが示されている。設置角の違いは最大洗掘深位置に表れ、水制設置角 120° の場合は全ケース最大洗掘深の発生個所が水制上流側の側壁近くに位置するのに対し、設置角 60° の場合は水制先端近くに位置することを実験より示している。

(各種水制形状の局所洗掘)

水制には様々な形状が存在し、Fig. 2.4 には日本で古くから使用されていた形状を示し、良く用いられる I 型、鎌出と呼ばれた L 型、オランダ人技師によって伝えられたケレップ水制 (Fig. 2.5) と呼ばれる T 型水制、その他にもアイスホッケーのブレードの形状をした Hockey-shape、I 型で先端に丸い形状を成す Mole-head 型などがある。

Fig. 2.4 水制の形状(日本水制工論⁴¹⁾,p.9)Fig. 2.5 クレップ水制(日本水制工論⁴¹⁾,p.13)

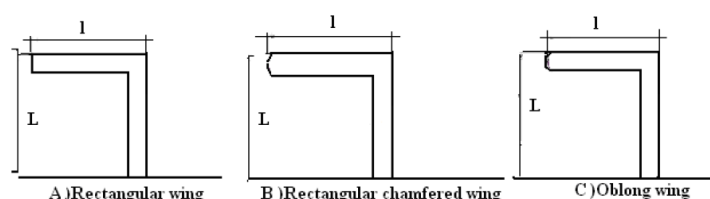
鈴木ら³⁵⁾はT型とL型水制について移動床実験を行い、水制形状の違いが洗掘深と洗掘形状に与える影響を考察している。T型水制はI型およびL型水制に比べて洗掘量が多く、そして洗掘範囲が上流側に大きくなる。そして、上流向きのL型水制がその中で最も洗掘が小さくなり、上流側へ張り出した先端付近で洗掘が進むことを実験結果より示している。

Masjedi ら³⁶⁾は180度湾曲水路を用いてT型水制の移動床実験を行い、フルード数 F_r 、水制長 L_s 、水制の流下方向長(Wing length) L_{wing} 、湾曲部の水制設置位置 θ をパラメータとして変更した実験を行い最大洗掘深との関係を導いている。T型水制の長さが大きくなれば最大洗掘深が大きくなり、流下方向長が長くなれば最大洗掘深が小さくなる。そして、水制設置位置が湾曲部75度の位置が実験内で最も最大洗掘深が大きくなった結果を示した。また、これらの実験結果を用いて以下の式を提示している。

$$\frac{e_m}{h} = 1.25(F_r)^{0.5} \left(\frac{L_s}{B}\right)^{0.25} \left(\frac{L_{wing}}{L_s}\right)^{0.05} \left(\frac{\theta}{180}\right)^{0.25} \ln\left(\frac{t+t_e}{t_e}\right)^{0.45} \quad (2.23)$$

ここで、 t, t_e は経過時間と洗掘孔の最大発達時間を示している。この式はT型水制の長さや湾曲水路の設置位置による最大洗掘深の時間変化をフルード数の関数として表している。

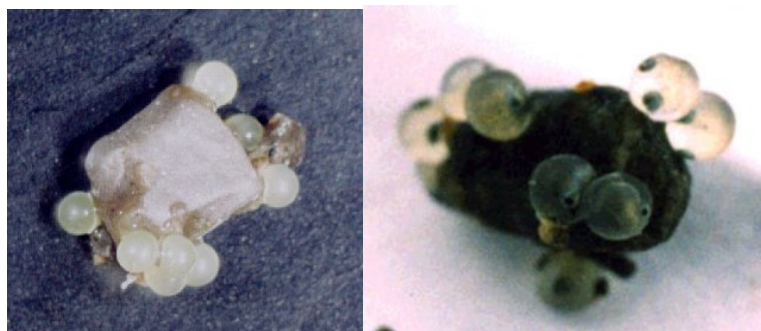
またMasjedi らは同じ180度湾曲水路を用いて上流向きのL型水制に対して、Wing先端の形状の洗掘深へ与える影響を確認するために、下図に示す先端形状に対して実験し比較を行っている。結果としては、C)の丸みを帯びた先端形状が最も洗掘深が小さく軽減された結果を示し、水制先端の形状も洗掘深へ影響を与えることを示している。

Fig. 2.6 Masjedi ら³⁷⁾の実験のL型水制ウィング形状

Rahman ら^{27) 28)}は、航路維持のためにバングラディッシュで伝統的に用いられているバンダル型水制について移動床実験を行っている。バンダル型水制は、透過と不透過型を組み合わせた形状となっており、上部が不透過で下部が透過型となっている。上部の不透過部分によって水刼ね効果を期待し、下部の透過部分では浮遊砂の鉛直濃度分布で高濃度となる下層部分は水制を通過させて水制間で土砂堆積を促す構造となっている。Rahman ら²⁷⁾の実験では、不透過とバンダル型水制を下流向きに 40° で兩岸に 20 基設置し平衡河床になるまで通水し河床形状の比較を行っている。主流路の河床低下については不透過型とバンダル型水制間で大きな差はなく洗掘傾向を示し、不透過型水制はバンダル型水制に比べて水制と側壁近傍で洗掘が大きく、航路維持と河岸侵食の面ではバンダル型水制が有効であることを実験より示している。

以上のように、水制に関する実験的研究は古くから精力的に行われており、これまで様々な現象が解明されてきた。しかし、まだまだ解明されていない現象も多く、今後さらなる研究が必要な分野である。例えば、これまでの移動床実験は流砂の複雑さから均一粒径を用いた実験が多く、粒度分布の違いが河床形状にもたらす影響、そして水制が河床表層の粒度分布変化にもたらす影響についても良く分かっていない。河床材料の粒度分布は河川を構成する重要な要素であり、流れに対する河床の安定性に強く関連するだけでなく、粒度分布の多様性が植生や魚など水生動植物の生息域等の生物環境の豊かさへと変わると言われており、今後、水制周辺の河床粒度分布を意識した混合砂のさらなる研究が必要である。

魚が棲める川の必須条件として、①流量の確保、②水質の確保、③避難場所の確保、④餌の確保、天敵からの保護、⑥産卵場の確保、⑦回遊路の確保、の全ての項目を満足する必要があるとされている⁴²⁾。それらのうち水制の設置により環境が改善すると期待される主な項目は、③と⑥の項目と考えられる。避難場所については、水制背後などの流速低減域が増水時の魚の避難場所と成り得ることは容易に想像が付く。魚の産卵場については、河床の粒度分布が産卵場環境の重要な因子であることが、これまでの研究によって示されている。例えば、淡水両側回遊魚の代表的な存在であるアユは、秋頃に河川下流域で産卵するが、河床状態として浮き石状態がアユの産卵場に適しており、泥が堆積するような場所ではアユは産卵しないことは良く知られている。浮き石状態とは礫間に細砂が充填されておらず、僅かな外力で礫が掃流するような状態であり、アユはその浮き石状態の河床砂礫を動かして凹部を作り、そこに卵を産む産卵行動を取る^{43) 44)}。



(神奈川県水産技術センター：http://www.agri-kanagawa.jp/naisui/n_index.asp)

Fig. 2.7 河床砂礫に産み付けられたアユの卵

鬼束ら⁴⁵⁾はアユの産卵に適した浮き石状態を定量的に評価するために、現地計測と室内実験を行い、摩擦速度が 0.05~0.12m/s の範囲内であれば河床が浮き石状態になる可能性が高いと述べている。そして、その鬼束らの結果を受けて、永矢⁴⁶⁾らは 1976 年に米国の国立生物研究所 (USGS) で開発された河川環境を生態学的な観点から評価する手法 IFIM のひとつの構成要素である PHABSIM(生息場物理特性モデル)と平面 2 次元流れ解析結果を用いて、掘削断面のアユ産卵場の評価を行っている。しかし、鬼束らも論文内で述べているように、摩擦速度が 0.05~0.12m/s の範囲にあることによって必ずしも浮き石状態となるとは限らないため、アユの産卵場評価にはさらなる評価指標が必要だと考えられる。石田⁴⁷⁾は相模川水系のアユ産卵生態について調査し、3.0cm 以下の砂礫にアユ卵が多く付着していたことを報告し、富田ら⁴⁸⁾は新潟県南部の海川においてアユの産着卵数と河床砂礫の粒径を合わせて計測し、2.0cm 以下の粒径に多くの着卵が見られ、特に 1.1~1.5cm の礫に付着した卵の割合が多かったことを調査より示している。また、アユの体のサイズによって動かすことの可能な礫の大きさが異なってくることに言及しており、粒径についてもある程度幅を有している場がアユの産卵床として好ましいと考えられている。電力中央研究所の研究報告⁴⁴⁾では、PHABSIM によるアユ産卵場評価に河床粒度分布に関する適正度を提案しており、調査より得られたアユ産卵場に理想的な河床砂礫の粒度分布と類似度が高いほど適正度が高くなるよう設定されている。また、サケやシシャモについても産卵床に適した粒径が報告されており、サケはアユと同様に浮き石状態が適しており、そして泥土および細砂の少ない河床で 0.5cm~3.0cm に多くの産着卵が確認され⁴⁹⁾、シシャモは 0.425~2.0mm の粒径で産着卵密度が高くなることが報告⁵⁰⁾されている。

以上のように、河床材料の粒度分布は魚の産卵場として重要な因子であることが分かり、近年には産卵場を人工的に造成しその効果を検証した報告⁵¹⁾がなされている。また、カマツカのように砂を直接口に含んで砂に付いた有機物を食べる魚や、ドジョウなどのように危険を感じた時や水温変化に対応するために細かな砂で構成された砂泥底を好んで生息場とする魚など、河床材料の粒度分布は魚の餌食や生息場にも影響を与え、魚種によって選好性が様々である。そのため、現在では多種多様な魚や植生への環境配慮から、河床地形だけでなく河床材料の粒度分布についても川幅全体に一樣ではなく多様性のある河床粒度分布環境が求められている。

本研究は、混合砂河床を用いた水制周辺の移動床実験を行い、粒度分布が流れに対する河床の安定性(洗掘)に与える影響の検討、そして、水制がつくり出す粒度分布の変化を把握し、水制がもたらす上述した水生動植物の生息域等の生物環境の変化を考える上で必要な基本情報を提供することになる。

2.3 数値解析を用いた既往研究

(水制周辺の流れおよび河床変動に関する数値解析)

水制の設計項目が数多くある中、目的に合った最適な設置を考える上で数値モデルを用いた数値実験は有力な手段である。水制周辺の流れおよび河床変動が正確に再現できる数値モデルが構築されれば、計算機に負担を強いるだけで、実験で同等の検討をするのに比べて人的な労力を大幅に軽減でき、費用面においても大幅な負担軽減を実現できる可能性が高い。また、数値解析では3次元空間の情報とその時間変化を含む4次元的な情報を得ることが可能で、さらには、実験では再現が難しい設定条件においても数値計算なら可能となる場合も少なくない。しかし、残念ながら現段階では、どんな河川構造物周辺の河床変動現象においても再現可能な信頼に足る数値解析モデルは構築されていない。

これまで記述したように水制周辺の流れ場は3次元的で、河床洗掘との相互作用で複雑な現象を有しており、この流れ場と河床変動が再現可能な数値解析モデルは、他の類似構造物へ応用しても信頼性の高い結果を得ることができる可能性は高いと考えられる。したがって、水制周辺の局所洗掘現象を精度良く再現できる数値解析モデルを構築する意義は、工学的な観点において非常に大きいと考えられる。

(計算モデルの分類)

基本的に河床変動に関する数値解析モデルは、①流れを計算するモデルと②流砂および河床地形変化に関するモデルの2つから構成されている。そして、流れを計算するモデルについては、Fig. 1.10に示すように、さらに断面積分モデル、水深積分モデルと三次元モデルに大別される。

断面積分モデル：一次元解析モデル（等流/不等流など）
水深積分モデル： <ul style="list-style-type: none">平面二次元解析モデル（静水圧近似）曲がりによる遠心力を考慮した水深積分モデル直加速度を考慮した水深積分モデル準三次元モデル：静水圧/非静水圧モデル （流速鉛直分布の仮定：関数近似）
三次元解析モデル： <ul style="list-style-type: none">静水圧三次元解析モデル（静水圧分布の仮定）三次元解析モデル

Fig. 2.8 流れモデルの分類

断面積分モデルは、対象としている計算区間が数十 km 程度と長く、また計算対象期間が非常に長い場合に用いられることが多い。例えば、ダム の堆砂計算などの長期的な堆砂量を計算する場合に良く用いられている。

水深積分モデルは平面二次元モデルとも呼ばれており、対象区間に湾曲部や瀬、淵などが存在するために流れが横断方向に偏りが生じたりする場合など、断面積分モデルでは計算精度に疑問が生じる場合などに用いる。水深積分モデルは、3 次元の基礎式を水深積分する際に用いられる仮定によってさらにいくつか分類される。水深積分モデルは、計算機負荷などの実用的な面で水深積分モデルは国内の実務で良く用いられており、近年では水深積分モデルのフレームワークの中で、欠点である流れの 3 次元性の影響をどうにか考慮できないかという視点で進められた研究もいくつか存在する（内田ら^{52) 53) 54)}、音田ら⁵⁵⁾）。

三次元解析モデルは、3 次元方向の運動方程式を解くモデルで、橋脚や本研究の対象である水制などの河川構造物周辺の流れの 3 次元性が強い対象に用いる。また、乱流の取り扱いで、レイノルズ平均された運動方程式を解く RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) モデル、計算格子幅より小さいスケールの運動を乱流モデルで解き計算格子幅より大きなスケールの運動は直接解く LES (Large Eddy Simulation) モデル、そして付加的な数値モデルを用いることなく再現する直接数値シミュレーション (Direct Numerical Simulation, DNS) に分けられる。また近年では、壁面近くを RANS モデルで計算し壁から離れた領域を LES モデルで計算するような、計算時間の点で有利な RANS-LES のハイブリッド型の計算が行われてきている。ただし、RANS と LES の境界で速度分布の不整合が生じる場合があり、その対処方法に関する研究も進められている。

近年の目覚ましいコンピュータの進歩があっても、三次元解析モデルはまだまだ計算負荷が大きいため、現状では計算対象範囲や計算時間を大きく設定することができず、河床変動モデルとの組み合わせを考えた場合、現時点では RANS モデルが三次元解析モデルにおいて実用的なように思われる。

Table 2.6 には、これまでの水制周辺の流れおよび河床変動の数値解析に関する研究について、対象とした水制タイプ、流れや河床変動モデルに着目して整理した。表に示すように解析モデルが年々高度化され、解析する対象場も非越流型水制周辺の平坦河床から徐々に複雑な場へ適用されていることが確認できる。

Table 2.6 水制周辺の流れおよび河床変動の数値解析に関する既往研究

年	著者	水制タイプ	流れ・河床変動モデル	河床形状/ 河床砂
1990	Tingsanchali・Maheswaran ⁵⁶⁾	・非越流 ・不透過 ・1基(単独水制)	・水深積分モデル ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床
1990	福岡・渡辺・西村 ⁵⁷⁾	・越流 ・不透過 ・水制群	・準三次元流れモデル ・掃流砂:平衡流砂量式 ・水制:外力	移動床/ 均一砂
1992	道上・檜谷 ⁹⁾	・非越流 ・不透過 ・1基	・三次元流れ解析モデル ・乱流:0 方程式 ・掃流砂:平衡流砂量式+非平衡場の堆積過程を簡易的にモデル化	移動床/ 均一砂
1995	Molls・Chaudhry・Khan ⁵⁸⁾	・非越流 ・不透過 ・1基	・水深積分モデル ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床
1997	河原・彭・藤井 ⁶⁰⁾	・越流 ・不透過 ・Series (6)	・三次元解析モデル(定常) ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床
1998	大槻・芦田・荒巻・劉・藤田 ⁶¹⁾	・非越流 ・不透過 ・水制群	・水深積分モデル ・掃流砂:平衡流砂量式 ・水制:擬似河床, 付加抵抗	移動床/ 混合砂
1998	福岡・西村・岡信・川口 ¹⁶⁾	・越流 ・不透過 ・Series	・静水圧仮定した三次元流れ解析モデル ・掃流砂:平衡流砂量式 ・水制:擬似河床高, 外力	移動床/ 均一砂
1998	Peng・Kawahara ⁶²⁾	・越流 ・不透過 ・<Single/Series>	・三次元解析モデル(定常) ・乱流:非線形 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床
2000	Zhou・Michiue・Hinokidani ⁶³⁾	・越流 ・不透過 ・1基 ・60,90,120°	・三次元流れ解析モデル ・乱流:LES	平坦床/ 固定床
2002	木村・細田・音田・富永・武田 ⁶⁴⁾	・越流 ・不透過 ・2基 ・60,120°	・三次元解析モデル ・乱流:標準型/非線形 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床
2001	長田・細田・村本・中藤 ⁶⁵⁾	・非越流 ・不透過 ・1基	・三次元解析モデル ・乱流:非線形 $k-\epsilon$ モデル ・掃流砂:非平衡流砂モデル	移動床/ 均一砂
2003	Miller・Roulund・Sumer・Fredsoe・Truelsen・Michelsen ⁶⁶⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・Vertical-wall/side slope	・三次元解析モデル ・乱流: $k-\epsilon$ Model	平坦床/ 固定床
2006	Zhang・Nakagawa・Muto・Baba ⁶⁷⁾	・越流 ・不透過 ・1基	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル ・掃流砂:平衡流砂量式	移動床/ 均一砂
2007	McCoy・Constantinescu・Weber ⁶⁸⁾	・越流/非越流 ・不透過 ・2基	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流: LES	平坦床/ 固定床
2008	McCoy・Constantinescu・Weber ⁶⁹⁾	・越流/非越流 ・不透過 ・連続水制(5基)	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流: LES	平坦床/ 固定床
2008a 2008b	Koken・Constantinescu ^{70) 71)}	・非越流 ・不透過 ・1基	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流: LES	固定床/ (平坦/洗掘河床)
2009a	Zhang・Nakagawa・Kawaike・Baba ³⁴⁾	・非越流 ・不透過 ・1基	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流:非線形 $k-\epsilon$ モデル	移動床/均一砂 固定床/洗掘河床
2009b	Zhang・Nakagawa ⁷⁴⁾	・非越流 ・1基 ・<透過/不透過>	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル ・掃流砂:平衡流砂量式	洗掘河床/ 固定床
2010	Teraguchi・Nakagawa・Kawaike・Baba・Zhang ⁷⁵⁾	・非越流 ・バンドル型水制 ・Series	・三次元解析モデル ・非構造格子 ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル ・掃流砂:平衡流砂量式	移動床/ 均一砂
2010	鈴木・門田・重松・田中 ³⁵⁾	・非越流 ・不透過 ・1基 ・I & T & L-Shape	・三次元解析モデル(SSIM) ・乱流:標準型 $k-\epsilon$ モデル	平坦床/ 固定床

これまで、水制に関する数値解析は、主に水深積分モデルや三次元解析モデルによってなされている。水深積分モデルを用いた研究としては、Tingsanchali・Maheswaran⁵⁶⁾や Molls ら⁵⁸⁾によって標準型 k-εモデルを用いた平坦固定床上の流れの再現検証がなされており、平坦河床においては鉛直方向に軸を持つ平面的な渦が水制背後で支配的であるため、水深積分モデルによってもある程度実験結果と一致した結果が得られている。また、大槻ら⁶¹⁾は数値解析モデルの実用面を考え、できるだけ簡易的な方法で水制の効果を考慮する手法として、疑似河床高と付加抵抗を水深積分モデルの河床せん断力に加え、90°湾曲水路に設置された水制群の流れと河床変動の実験に計算モデルを適用している。計算結果と実験結果に水制近傍の局所的な差は見られるものの、水制近傍の流速低減、洗掘位置のシフトは再現している。水制近傍の局所的な場は見ずに、水制の影響による主流路の流速増や水制背後の流速低減域の効果については、平面二次元モデルでもある程度検討できることを示している。しかし、平面二次元モデルでは、平坦河床の水制背後で生じる鉛直軸を持つ平面渦は再現できても、水制周辺の河床洗掘後に発生するような水平方向に軸を持つ縦渦などの流れの3次元性が強い場所の河床変動の再現性は期待できない。そして、その縦渦などの流れの3次元性が水制設置範囲外にも影響を及ぼす場合があるため、平面二次元解析モデルを用いる場合には計算結果の評価に注意が必要である。

福岡ら¹⁶⁾は静水圧を仮定した三次元解析モデルを用いた解析を行っている。静水圧を仮定した三次元モデルは、静水圧を仮定しない三次元モデルに比べて計算負荷が大幅に小さいため、実河川程度の対象範囲を計算する場合に有用である。水制の影響を外力によって考慮し平衡流砂量式を用いて越流型水制の移動床実験に適用し、若干洗掘深が小さく堆積傾向の位置は異なるが、洗掘孔の形状は概ね再現できている。しかし、福岡らの論文内でも記述されているが、静水圧を近似した三次元モデルでは、洗掘が小さい実験ケースについてはある程度再現可能であるが、水制近傍において大きな深掘れを伴うような流れについては、静水圧近似が成り立たないため流れ場の再現精度が悪くなり、洗掘孔が小さく計算される傾向を有しているため注意が必要である。

次に三次元解析モデルによる水制周辺の数値解析では、道上・檜谷⁹⁾が静水圧を仮定せずに3次元流れと河床変動を計算し、水制周辺の流砂の解析においては流砂の非平衡性を考慮する必要性を訴え、平衡流砂量式と非平衡場の堆積過程を簡易的にモデル化し、非越流型水制周辺の洗掘過程の解析を先駆的に行っている。また、洗掘進行過程において洗掘孔へりから砂がずり落ちる現象をモデル化する必要性も同時に訴えている。

Peng・Kawahara⁶²⁾は直角越流型水制、木村ら⁶⁴⁾は斜め越流型水制の流れ場に対して標準型 k-εモデルおよび非線形乱流 k-εモデルを適用した三次元流れ解析を行っている。どちらの研究も固定床の平坦河床上の流れ場を対象としているが、計測している実験結果と計算結果を比較し、水制周辺の流れ場を良好に再現していることを示している。そして、大きな差ではないが非線形渦粘性モデルの方が標準型 k-εモデルより精度良く計算できることを示している。水制周辺の洗掘河床については、Zhang ら³⁴⁾が非越流型水制の実験に対して非線形 k-εモデルを用いた三次元流れ解析モデルを適用しており、水制周辺の渦の再現性で良好な計算結果を示している。

長田ら⁶⁵⁾は道上・檜谷ら⁹⁾の指摘を受けて、三次元流れ解析モデルに加えて掃流砂の非平衡性を考慮した非平衡流砂モデルを構築し、道上・檜谷ら⁹⁾が行った非越流型水制1基の移動床実験に計算モデルを適用している。その非平衡流砂モデルでは、掃流砂の運動を滑動形式で代表させた砂粒の運動

方程式を解くことによって土砂の移動および堆積をモデル化している。長田らの解析モデルによって得られた結果は、これまでのどのシミュレーション結果より水制周辺の洗掘過程を精度良く解析することに成功しているが、最大洗掘深および洗掘孔の平面的な大きさがまだ若干小さい結果となっている。論文内では、流砂モデルの課題としては、全て掃流形態でモデル化していることが問題として挙げられている。

Zhang ら^{67) 74)}は非構造格子を用いた三次元流れ解析と平衡流砂量式を用いて、不透過型だけでなく透過型である杭出し水制周辺の洗掘過程を解析している。構造格子では透過型水制近辺の格子解像度を密にすると全体の格子密度に影響し格子数が膨大になるが、非構造格子を用いて水制周辺のみを密に格子形成して杭を正確に表現し、格子系の利点を生かした解析を行っている。若干洗掘深および洗掘孔の大きさは過小評価しているが、洗掘形状は概ね再現できている。また、Teraguchi ら⁷⁵⁾もまた非構造格子の利点を生かし、より複雑な水制上部が不透過で下部が透過型であるバンドル型水制周辺の流れ場の解析を行っている。

また、Zhou ら⁶³⁾は Smagorinsky モデルを用いた LES により、平坦河床に限定されるが設置角度の異なる 3 種類 (60° , 90° , 120°) の越流型水制周辺の流れ場の解析を行い、設置角度 120° (attracting) の結果が最も水制背後の流速低減域が長く、水制背後の渦による底面や側岸流速が小さくなることを計算結果から示している。

McCoy ら^{68) 69)}、Koken・Constantinescu^{70) 71)}は、PIV 法や流速計による計測のみでは水制周辺の非定常の三次元的な流速場の把握が難しいと考え、Mahesh ら^{72) 73)}が開発し精度検証確認済みの LES モデルを用いて、詳細な計算格子によって水制周辺の三次元流れ解析を行い、流れの非定常場の把握に努めている。McCoy らは平坦河床上の 2 基の水制間の流れについて着目しており、PIV 技術や流速場の直接計測によっては把握が難しい越流型の水制間と主流域との物質交換、そして運動量輸送の時間変化について着目し、汚染物質濃度の移流拡散方程式を解いて得られた結果より考察を行っている⁶⁸⁾。水制間に存在する汚染物質の多くが上部から流出しており、初期に存在する汚染物質の 44% は水制間に挟まれた領域の上部領域から流出すること計算結果より示している。また、Koken・Constantinescu^{70) 71)}は非越流型直角水制について平坦河床と移動床実験より得られた平衡状態の洗掘河床において、LES モデルによる流れ場の解析を行い流れの三次元構造について考察を行っている。平坦河床の流れ解析では、水制前面から発生する馬蹄形渦だけではなく小さな渦がいくつも水制前面で発生しており、また並行して存在する 2 つの馬蹄形渦によって河床せん断力に 2 つのピークが存在する可能性を数値計算結果より示している。また水制先端近くの摩擦速度結果の経時変化より、LES の解析結果は時間変動が激しく瞬間的に平均値より 3 割程度大きくなる時もあり、RANS モデルでは砂が動かない計算でも LES と河床変動モデルを組み合わせた計算では砂が徐々に輸送されるような結果が得られることを示唆している。また洗掘河床の LES 解析によって、洗掘孔内部で複数の小さな渦と大きな渦で構成される複雑な流れ場を示し、水制前面の馬蹄形渦が形成される領域において、洗掘孔底部の逆流が強いモードと弱いモードが非周期的に表れ強い非定常性を有していることを解析によって示している。

以上、これまでの研究により水制周辺の流れは三次元性が強く水深積分モデルや静水圧を考慮した三次元モデルでは再現が難しいことが示され、近年の数値解析としては三次元解析が主流となっている。LES については、流れの非定常性を捉え RANS モデルに比べ一般的に精度が高いが、計算格子を細かく作成する必要があることから計算負荷が非常に大きく、河床変動を含む解析事例は少なく、特に水制周辺の河床変動解析を対象とした研究および解析事例はまだ見当たらない。また、流砂モデルとしては、水制周辺の渦によって河床せん断力分布の空間的な変化が激しく、そして局所勾配も大きいいため、流砂の非平衡性を考慮したモデルでないと高い再現精度が望めないことが考えられる。本研究では水制がもたらす粒度分布の変化を予測することが可能な解析モデルの構築が目的であるため、流れについては計算精度と計算負荷のバランスのとれた三次元 RANS モデルが現実的と考え、流砂モデルについては滑動形式の砂粒の運動方程式で掃流砂を解く非平衡流砂モデルを採用し、混合粒径の計算が可能な計算モデルの構築を図った。本研究の解析モデルの詳細については第 5 章に記述した。

参考文献

- 1) 椿東一郎 (1959) : 水制に関する実験的考察, 年次学術講演会, III-26, pp. 53-54.
- 2) 栗津清蔵 (1962) : 水制工に関する研究 (第一報), 年次学術講演会, II-30, pp. 69-72.
- 3) 栗津清蔵 (1964) : 水制工に関する研究 (第二報), 年次学術講演会, II-14, pp. 1-2.
- 4) 栗津清蔵 (1964) : 水制工に関する研究 (第三報), 年次学術講演会, II-17, pp. 1-2.
- 5) 土屋照彦・石崎勝義 (1966) : 水制の洗掘, 水理講演会論文集, 第10巻, pp. 65 - 70.
- 6) 土屋照彦・石崎勝義・丸山幾男 (1968) : 水制の水はね機能について, 年次学術講演会, II-113, pp. 309-310.
- 7) 椿東一郎・田原誠 (1969) : 水制の機能について (移動床における河床変動), 年次学術講演会, II-75, pp. 199-202.
- 8) 中崎昭人・玉井佐一 (1972) : 水理構造物による河床の局所洗掘に関する実験的研究 - II. 水制周辺の洗掘について, 高知大学学術研究報告, 第21巻, 自然科学第19号, pp. 317- 328.
- 9) 道上正規・檜谷治 (1992) : 水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.61-66.
- 10) 富永晃宏・劉建・三尾憲史・大橋基良 (1994) : 非越流型水制の設置角度の影響に関する実験的研究, 第49回年次学術講演会, pp.302-303.
- 11) 陳飛勇・池田駿介 (1996) : 水制周りの水平剥離渦の構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.787-792.
- 12) Melville, B. W. (1988) : Design method for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.114, No.10, pp.1210-1226.
- 13) Melville, B. W. (1992) : Local scour at bridge abutments, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.118, No.4, pp.615-31.
- 14) Melville, B. W. (1995) : Bridge abutment scour in compound channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.121, No.12, pp.863-868.
- 15) Melville, B. W. (1997) : Pier and abutment scour : Integrated approach, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.124, No.2, pp.125-136
- 16) 福岡捷二・西村達也・岡信昌利・川口広司 (1998) : 越流型水制周辺の流れと河床変動, 水工学論文集, 第42巻, pp.997-1002.
- 17) 池田駿介・吉池智明・杉本高 (1999) : 不透過水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, 水工学論文集, 第43巻, pp.281-286.
- 18) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2000) : Experimental study of flow behavior around submerged spur-dike on rigid bed, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.44, pp.539-544.
- 19) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001) : Movable bed scour around submerged spur-dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.45, pp.373-378,2001.
- 20) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001) : Characteristics of scour around repelling spur-dikes,

- proceedings of the 29th IAHR Congress, Beijing, China, Theme D, Vol. II, pp. 343-349.
- 21) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001) : An investigation of scour around attracting spur-dikes, proceedings of the 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements, pp. 111-118.
 - 22) 富永晃宏・中野義郎・藤田亨良 (2000) : 越流型水制域内の流れ構造の可視化解析, 水工学論文集, 第 44 巻, pp.1041-1046.
 - 23) 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛(2000) : 越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, Vol.3, pp.805-812.
 - 24) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎 (2001) : 斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.379-384.
 - 25) 富永晃宏・井嶋康二 (2002) : 越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.475-480.
 - 26) 富永晃宏・田本典秀 (2004) : 越流型連続水制周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.805-810.
 - 27) Rahman, Md., Nakagawa, H., Khaleduzzaman, A., Ishigaki, T., Muto, Y. (2004) : On the formation of stable river course, *Annual of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, No.47B.
 - 28) Rahman, Md., Nakagawa, H., Khaleduzzaman, A., Ishigaki, T. (2005) : Formation of navigational channel using bandal-like structures, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.49, pp.997-1002.
 - 29) Yeo, H.K., Kang, J.G., Kim S.J. (2005) : An experimental study on tip velocity and downstream recirculation zone of single groynes of permeability change, *Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol.9, No.1, pp.29-38.
 - 30) Ezzeldin, M. M., Saffan, T. A., Rageh, O. S., Nejm, L. M. (2007) : Local scour around spur dikes, Eleventh International Water Technology Conference, IWTC11 2007 Sharm El-Sheikh, Egypt, pp.779-795.
 - 31) Nasrollahi, A., Ghodsian, M., Neyshabouri, S.A.A.S. (2008) : Local scour at permeable spur dikes, *Journal of Applied Sciences*, 8(19), pp. 3398-3406.
 - 32) Duan, J., He, L., Fu, X., Wang, Q. (2009) : Mean flow and turbulence around experimental spur dike, *Advances in Water Resources* 32, pp.1717-1725.
 - 33) Vaghefi, Md., Ghodsian, M., Neyshaboori, S. (2009) : Experimental study on the effect of a T-shape spur dike length on scour in a 90° channel bend, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 34, No.2B, pp.337-348.
 - 34) Zhang, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y. (2009) : Experiment and simulation of turbulent flow in local scour around a spur dyke, *International Journal of Sediment Research*, 24, pp.33-45.
 - 35) 鈴木幸一・門田章宏・重松和恵・田中健治 (2010) : T 型・L 型水制に起因する河床形状変化特性, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.817-822.
 - 36) Masjedi, A., Dehkordi, V., Alinejadi, M., Taeedi, A. (2010) : Experimental study on depth in around a

- T-shape spur dike in a 180 degree bend, *Journal of American Science*, 6 (10), pp. 886-892.
- 37) Masjedi, A., Nadri, A., Taeedi, A., Masjedi, I. (2010) : Control of local scour at single L-shape spur cike with wing shape in flume bend, *Journal of American Science*, 6 (10), pp. 893-897.
- 38) Ouillon, S., Dartus, D. (1997) : Three-dimensional computation of flow around groyne, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.123, No.11, pp.962-970.
- 39) Ho, J., Yeo, H.K., Coonrod, J., Ahn, W.S. (2007) : Numerical modeling study for flow pattern changes induced by single groyne, 32nd Congress of IAHR, Venice, Italy, CD-ROM.
- 40) Chin, C. O., Mellville, B. W., Raudkivi, A. J. (1994) : Streambed armoring, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.120, No.8, pp.899-918.
- 41) 眞田秀吉 (1932) : 日本水制工論, 岩波書店.
- 42) 玉井信行・水野信彦・中村俊六 (1993) : 河川生態環境工学, 東京大学出版.
- 43) 石田力三 (1959) : アユの産卵生態(I)―産卵群の構造と産卵行動―, 日本水産学会誌, Vol. 25, No. 4, pp.259-268.
- 44) 財団法人電力中央研究所 (2005) : 河川流況に起因するアユ産卵環境の変動予測手法, 電力中央研究所報告, 環境, V04009.
- 45) 鬼束幸樹・永矢貴之・白石芳樹・東野誠・高見徹・的間眞二・秋山壽一郎・尾関弘明・畑中弘憲・中川由美子 (2008) : アユの産卵に適した浮き石状態の発生条件, 環境工学研究論文集, 第 44 巻, pp.59-66.
- 46) 永矢貴之・釜瀬明日香・白石芳樹・鬼束幸樹・東野誠・高見徹・東均・秋山壽一郎 (2009) : アユ産卵場の保全と創出を目指した河道掘削断面の選択手法の提案, 河川技術論文集, 第 15 巻.
- 47) 石田力三 (1961) : アユの産卵生態(II)―産卵魚の体型と産卵床の砂礫の大きさ―, 日本水産学会誌, Vol. 27, No. 12, pp.1052-1057.
- 48) 富田政勝・野上泰宏・工藤周子・樋口正仁 (2005) : アユの産卵数と着卵石サイズ, 流速および水深について (短報), 新潟県水面水産試験場調査研究報告, No.29, pp.1-4.
- 49) 佐野誠三 (1959) : 北日本産サケ属の生態と蕃殖について, 北海道さけ・ますふ化場研究報告, 第 14 号, pp.21-90.
- 50) 新居久也・村上一夫・米田隆夫・上田宏 (2006) : シシャモ *Spirinchus lanceolatus* の遡上河川における産卵場所と物理環境条件の関係, 日本水産学会誌, Vol. 72, No.3, pp.390-400.
- 51) 近藤正美・泉川晃一・小坂田堅・大槻清人・笹田直樹 (2011) : アユ人工産卵場造成手法の検討, 水産技術, 第 3 巻, 第 2 号, pp.137-145.
- 52) 内田龍彦・福岡捷二 (2009) : 浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.1081-1086.
- 53) 内田龍彦・福岡捷二 (2010) : 水平方向渦度方程式を用いた底面流速の半直接解法と橋脚周りの局所洗掘解析, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.841-846.
- 54) Uchida, T. and Fukuoka, S. (2011) : Numerical simulation of bed variation in a channel with a series of submerged groins, Proceedings of the 34th IAHR Congress, Brisbane, Australia, CD-ROM, pp. 4292-4299.

- 55) 音田慎一郎・細田尚・木村一郎・岩田通明(2011)：水深積分モデルにおける馬蹄形渦のモデル化とその検証について，*水工学論文集*，第 55 巻，pp.1003-1008.
- 56) Tingsanchali, T., Maheswaran, S. (1990)：2-D depth-averaged flow computation near groyne, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.116, No.1, pp.71-86.
- 57) 福岡捷二・渡辺明英・西村達也 (1990)：水制工の適切な配置決定のための三次元モデルの開発，*水工学論文集*，第 34 巻，pp.337-342.
- 58) Molls, T., Chaudhry, M. H., Khan, K. W. (1995)：Numerical simulation of two-dimensional flow near a spur-dike, *Advances in Water Resources*, Vol. 18, No.4, pp.227-236.
- 59) 崇田徳彦・清水康行 (1994)：水制を含む流れの準 3 次元数値解析モデルの開発，*土木学会論文集*，No.497/ II-28, pp.31-39.
- 60) 河原能久・彭静・藤井和之 (1997)：越流型水制工を有する河道内の流れの 3 次元数値解析，*河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集*，第 3 巻，pp.17-22.
- 61) 大槻英樹・芦田和男・荒巻浩・劉炳義・藤田暁 (1998)：河道湾曲部における水制機能の予測手法，*河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集*，第 4 巻，pp.35-40.
- 62) Peng, J., Kawahara, Y. (1998)：Application of linear and non-linear k- ϵ models to flows around spur dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.42, pp.643-648.
- 63) Zhou, Y., Michiue, M., Hinokidani, O. (2000)：A numerical method of 3-D flow around submerged spur-dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, Vol.44, pp.605-610.
- 64) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎 (2001)：斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析，第 15 回数値流体力学シンポジウム，E04-2.
- 65) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・中藤達昭 (2001)：3 次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析，*土木学会論文集*，No.684/ II-56, pp.21-34.
- 66) Miller, R., Roulund, A., Summer, B. M., Fredsoe, J., Truelsen, C., Michelsen, J. (2003)：3-D numerical modeling of flow around a groin, *Proceedings of the IAHR Congress, Thessaloniki, Greece*, Vol. 2, pp. 385-392.
- 67) Zhang, H., Nakagawa, H., Muto, Y., Baba, Y. (2006)：Numerical simulation of flow and local scour around hydraulic structures, *River Flow 2006, Libson*, pp.1683-1693.
- 68) McCoy, A., Constantinescu, G., Weber, L. (2007)：A numerical investigation of coherent structures and mass exchange processes in channel flow with two lateral submerged groynes, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 43, W05455.
- 69) McCoy, A., Constantinescu, G., Weber, L. (2008)：Numerical investigation of flow hydrodynamics in channel with a series of groynes, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No.2, pp.157-172.
- 70) Koken, M., Constantinescu, G. (2008)：An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 1. Conditions corresponding to the initiation of the erosion and deposition process, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44, W08406.
- 71) Koken, M., Constantinescu, G. (2008)：An investigation of the flow and scour mechanisms around isolated spur dikes in a shallow open channel: 2. Conditions corresponding to the final stages of the

- erosion and deposition process, *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44, W08407.
- 72) Mahesh, K., Constantinescu, G. and Moin, P. (2004) : A numerical method for large eddy simulation in complex geometries, *Journal of Computational Physics* 197, pp. 215–240.
- 73) Mahesh, K., Constantinescu, G. and Moin, P. (2006) : Large eddy simulation of reacting turbulent flows in complex geometries, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, pp. 374–381.
- 74) Zhang, H., Nakagawa, H. (2009) : Characteristics of local flow and bed deformation at impermeable and permeable spur dykes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.53, pp.145–150.
- 75) Teraguchi, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H. (2010) : Morphological changes induced by river training structures: Bandal-like structures and groins, *Annals of Disaster Prevention Research Institute*, Kyoto University, No.53B.

第3章

混合砂河床を用いた水制周辺の局所洗掘に関する実験

3.1 はじめに

本章では、2 章で述べたように研究事例が少ない水制周辺の混合砂河床の洗掘現象について検討を行っている。まず研究の第一歩として、これまで行われている水制に関する移動床実験で成果も多く、基本的な実験条件と考えられる非越流型直角水制 1 基に対して均一砂と混合砂河床を用いて移動床実験を行い、特に水制がもたらす河床表層の粒度変化と 3 次元的な流れ構造の関係について明らかにする。

3.2 実験条件と実験方法

▼3.2.1 実験水路

実験には、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリーの幅 0.4m、長さ 8m、路床勾配 $i=1/1000$ の長方形直線開水路（Fig. 3.1）を用いた。Fig. 3.2 にはその実験水路の模式図を示す。図のように上流側の整流部を経て 4m の位置に長さ 1.7m のサンドピットを設けた水路を用いた。水路の下流端にはゲートが設けられており、その高さを変えることによって水位の調節を行うことが可能となっている。また、移動床開始地点（サンドピット上流端）から 50cm 下流の右岸側に長さ 10cm、幅 1cm の非越流型不透水制を側壁に直角になるように設置し実験を実施した。実験開始の手順は、まず下流端のゲートを閉じ河床の砂粒が動かぬように水を塞き止めながら水路内をゆっくりと水で満たし、そして水深が条件として設定した値に到達した後、塞き止めたゲートとポンプのバルブを開け設定した流量を通水し実験を開始している。



Fig. 3.1 実験水路

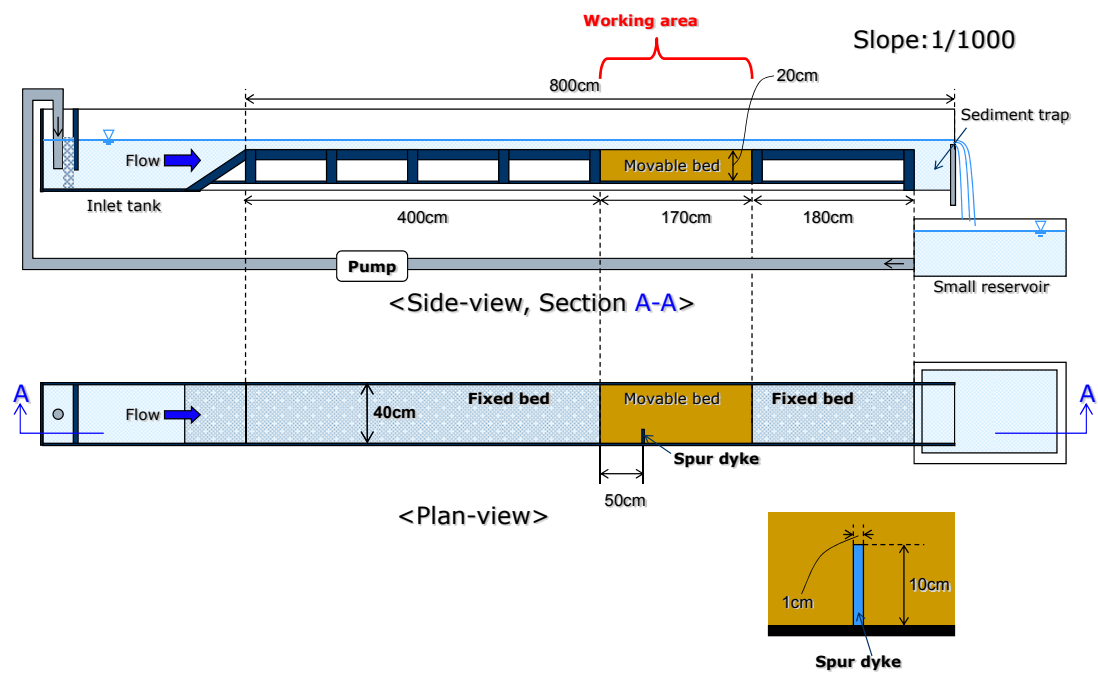


Fig. 3.2 実験水路模式図

▼3.2.2 水理条件

本実験の接近流れの水理条件を Table 3.1 に示す。本章の実験では、水制上流側から与える水理条件を固定し、河床材料条件のみを変更することによって河床粒度の違いが周辺の地形変化、そして河床表層の粒度分布変化に与える影響を明らかにする。

Table 3.1 水理条件

流量 Q (ℓ/s)	5.7
水路勾配 I	1/1000
水路幅 B (cm)	40.0
水深 h_0 (cm)	5.0
接近流速 U_0 (cm/s)	28.5
摩擦速度 u_* (cm/s)	1.98
砂の密度 (g/cm ³)	2.65
水制長さ L (cm)	10.0
水制幅 (cm)	1.0
Reynolds 数 $R_e = U_0 h_0 / \nu$	14,250
Froude 数 $Fr = U_0 / \sqrt{gh_0}$	0.41

▼3.2.3 河床材料条件と実験ケース

実験に使用した砂は、珪砂 2 号, 3 号, 4 号, 5 号, 6 号, 7 号を用い、それぞれ平均粒径は 2.38mm, 1.7mm, 1.03mm, 0.48mm, 0.31mm, 0.17mm となっている (Table 3.2, Fig. 3.3)。そして、Table 3.2 には珪砂各号の平均粒径 D_m と砂粒レイノルズ数 ($R_* = u_* d / \nu$) および無次元掃流力 τ_* ($= u_*^2 / ((\sigma/\rho) - 1)gd$) もあわせて示し、Fig. 3.4 に示す Shields Diagram に各号の本実験条件における値を示した。Fig. 3.4 には無次元限界掃流力と砂粒レイノルズ数の関係が示されており、図には次の岩垣の近似式¹⁾もあわせて示されている。

$$\begin{aligned}
 R_* \geq 671 & \quad ; \quad u_{*c}^2 = \tau_c / \rho = 0.05 \{ (\sigma/\rho) - 1 \} gd \\
 162.7 \leq R_* \leq 671 & \quad ; \quad = [0.01505 g \{ (\sigma/\rho) - 1 \}]^{25/22} \nu^{-3/11} d^{3/22} \\
 54.2 \leq R_* \leq 162.7 & \quad ; \quad = 0.034 \{ (\sigma/\rho) - 1 \} gd \\
 2.14 \leq R_* \leq 54.2 & \quad ; \quad = [0.1235 g \{ (\sigma/\rho) - 1 \}]^{25/32} \nu^{7/16} d^{11/32} \\
 R_* \leq 2.14 & \quad ; \quad = 0.14 \{ (\sigma/\rho) - 1 \} gd
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

この式は水深および勾配測定の実験誤差が入らないように閉管路実験によって求められた実験公式である。また、実務では砂粒の比重 σ/ρ を 2.65 とし、の水の動粘性係数 $\nu = 0.01 \text{ cm}^2 / \text{sec}$ (20.3°C)、重

力加速度 $g = 980 \text{ cm/sec}^2$ 用いて cm 単位で簡易化した次式を良く用いている。

$$\begin{aligned}
 d \geq 0.303 \text{ cm} & \quad ; \quad u_{*c}^2 = \tau_c / \rho = 80.9d \\
 0.118 \leq d \leq 0.303 \text{ cm} & \quad ; \quad = 134.6d^{31/22} \\
 0.0565 \leq d \leq 0.118 \text{ cm} & \quad ; \quad = 55.0d \\
 0.0065 \leq d \leq 0.0565 \text{ cm} & \quad ; \quad = 8.41d^{11/32} \\
 d \leq 0.0065 \text{ cm} & \quad ; \quad = 226d
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Fig. 3.4 より本実験の水理条件で均一砂の移動床実験を行った場合には、珪砂の2号から4号までは水制を設置しない場合において砂粒は移動しないことが確認できる。

Table 3.2 珪砂号数とその平均粒径・砂粒レイノルズ数・無次元掃流力

珪砂号数	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
平均粒径 $D_m(\text{mm})$	2.38	1.70	1.03	0.48	0.31	0.16
砂粒レイノルズ数 Re_*	361	218	103	33	17	7
無次元掃流力 τ_*	0.010	0.014	0.024	0.051	0.078	0.146

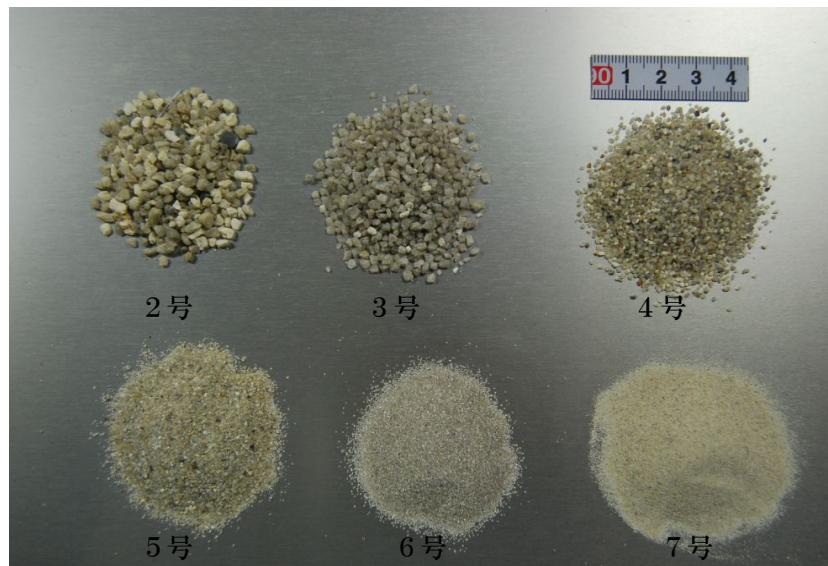


Fig. 3.3 実験で用いた河床材料（珪砂）

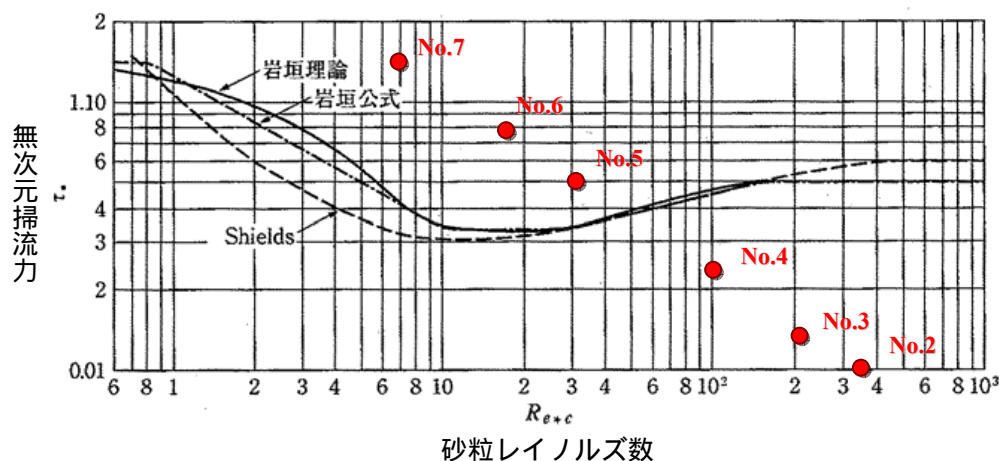


Fig. 3.4 無次元限界掃流力と粒子レイノルズ数の関係（水理公式集，1999）²⁾

Table 3.3 には実験のケース番号とその河床材料条件を示す。Case1 から Case4 までは粒径の異なる均一砂ケース，Case5 から Case9 は混合砂ケースとなっている。 D_{m0} は初期平均粒径， σ_g は河床材料の幾何標準偏差， u_* ， u_{*cm} ， τ_{*m} はそれぞれ摩擦速度と上記した水理条件より求めた平均粒径に対する限界摩擦速度，無次元掃流力を示している。

Table 3.3 実験ケースと河床材料条件

Case No.	Case Name	河床材料	$D_{m0}(\text{mm})$	σ_g	u_*/u_{*cm}	τ_{*m}
1	U-2	均一砂(No.2)	2.38	1.48	0.49	0.010
2	U-3	均一砂(No.3)	1.70	1.19	0.62	0.014
3	U-4(Mix0)	均一砂(No.4)	1.03	1.14	0.83	0.024
4	U-6	均一砂(No.6)	0.31	1.44	1.18	0.078
5	Mix1-WG1	混合砂(Mix1)	0.86	2.36	0.91	0.028
6	Mix2-GG1	混合砂(Mix2)	1.00	2.62	0.85	0.024
7	Mix3-WG2	混合砂(Mix3)	1.01	3.62	0.82	0.023
8	Mix4-GG2	混合砂(Mix4)	1.05	4.30	0.84	0.024
9	Mix5-CS	混合砂(Mix5)	1.01	2.55	0.84	0.024

※幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

混合砂ケースについては，珪砂 3 号から 6 号までを均等割合で作成した混合砂（Mix1-Well Graded1:WG1），3 号と 6 号を 1:1 の割合で作成した不連続粒度の混合砂（Mix2-Gap Graded1:GG1），2 号から 7 号までを均等割合で作成した混合砂（Mix3-Well Graded2:WG2），2 号と 7 号を 2:3 の割合で作成した不連続粒度混合砂（Mix4-Gap Graded2:GG2），そしてカラーサンドを用いて作成した混合砂（Mix5-Color Sand:CS）の 5 種類である。Table 3.3 にはこれらの河床条件が想像できるようなケース名もあわせて示している。各混合砂河床については，平均粒径が同等の均一砂と混合砂河床を比較するため，本実験では各混合砂を Case3(No.4)の平均粒径 1mm に近くなるよう考慮して設定している。Table 3.3 に示した幾何標準偏差 σ_g が示すように，U-4(Mix0)，Mix-WG1，Mix-CS，Mix-GG2，Mix-WG2，

Mix-GG2 の順に粒径範囲の幅が広がる河床材料条件となっている。混合砂の初期河床作成時には、河床の粒度分布にムラができないように水路外で良く混ぜ合わせて後に水路に投入し、初期の平坦河床の作成を行った。

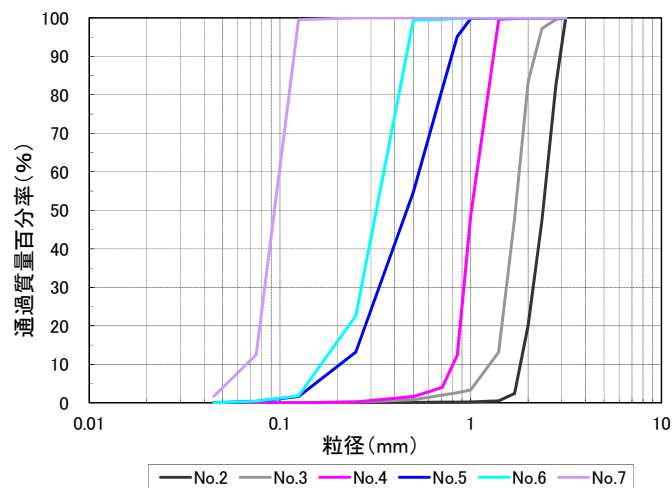


Fig. 3.5 均一砂の粒度分布

Table 3.4 各混合砂ケースの詳細

Mix1-WG1	3号～6号までを均等割合で混合（Well Graded）
Mix2-GG1	3号と6号を1:1の割合で混合した不連続粒度混合砂（Gap Graded）
Mix3-WG2	2号～7号までを均等割合で混合（Well Graded）
Mix4-GG2	2号と7号を2:3の割合で混合した不連続粒度混合砂（Gap Graded）
Mix5-CS	カラーサンド（Well Graded）

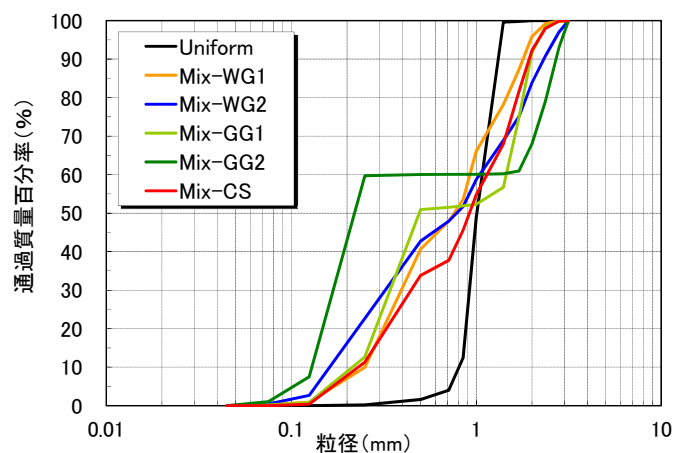


Fig. 3.6 混合砂河床の粒度分布

カラーサンド混合砂を用いた実験については、粒径区分を色分けすることによって、河床表層粒度分布の違いが目視および撮影画像によって確認し易くなる。実験で用いたカラーサンドは、珪砂の表面に陶磁器用無機顔料を高温熔炉で焼成溶着されたものである (Fig. 3.7)。それらを Fig. 3.9 に示すように、範囲が重ならないようにふるいで3つの粒径区分に分け、粒径の小さい区分から赤・青・黒と色分けし混合して用いた。Fig. 3.8 には3色を混合した河床材料の写真を示す。色分けすることによって通水中や通水後の河床表層の色の分布より、その地点の卓越する粒径範囲を目視や撮影画像によって把握することが可能となる。

最後に、本実験の水理条件では、上記したように平均粒径を 1mm に近づけて設定しており Fig. 3.4 で示す Shields Diagram では平均粒径で考えると珪砂 4 号の値と近くなり、活発な土砂移動は水制周辺のみに限られるため、今回の実験全ケースにおいて上流からの土砂供給は行っていない。

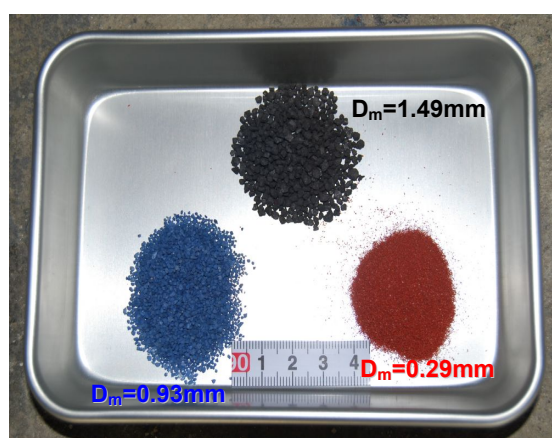


Fig. 3.7 混合前のカラーサンド (珪砂)

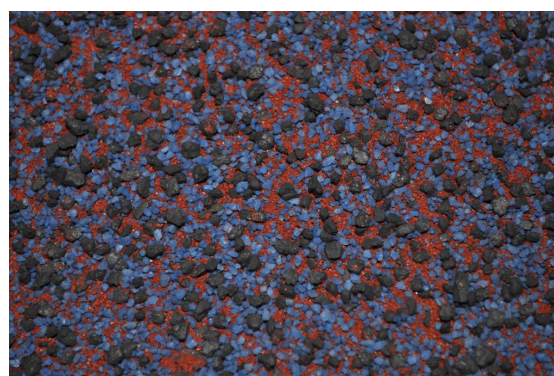


Fig. 3.8 混合後のカラーサンド

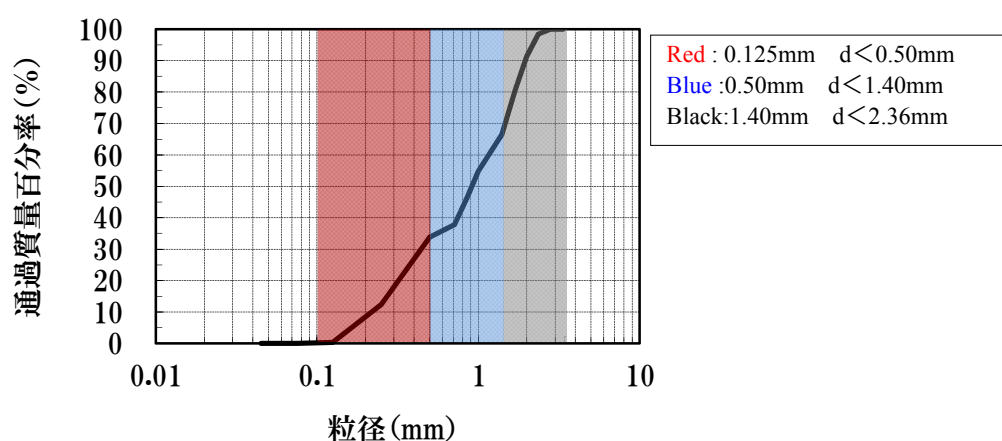


Fig. 3.9 カラーサンドケース (Mix5) の粒度分布

▼3.2.4 河床高の計測方法

河床計測には KEYENCE 社製 LK-2000 のレーザー変位計を用いた。通水後に実験水路と移動床範囲に溜まった水を抜き、水路上部の縦横断方向に移動可能な台車に設置されたレーザー変位計を用いて計測を行った。レーザー変位計からの出力電圧を AD コンバータでデジタル信号に変換し PC にてデータを収集している。計測範囲は、Fig. 3.10 に示すように移動床開始地点 ($x=0$) から下流 160cm の範囲で、縦断方向には $x=0.0\text{cm}\sim 20\text{cm}$, $110\text{cm}\sim 160\text{cm}$ の範囲は 2cm 間隔, $x=20\text{cm}\sim 110\text{cm}$ の範囲では水制周辺の局所洗掘された河床形状を捉えるため 1cm 間隔で密に河床高の計測を行い、横断方向には右岸側壁を基準($y=0$)とし $y=0.5\text{cm}\sim 39.5\text{cm}$ の範囲で一律 1cm 間隔にて河床高計測を行った。

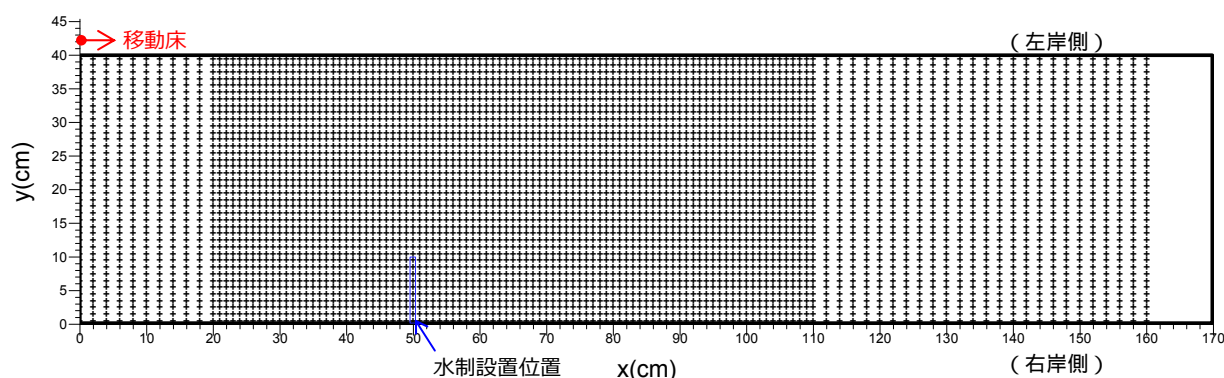


Fig. 3.10 河床高計測地点

▼3.2.5 河床表層粒度分布の計測方法

河床粒度の計測については、通水後の河床表層の砂を直径 2cm の範囲において、砂粒の最大粒径程度である厚さ 2.5mm 程度を目安に葉さじで採取し、ふるい分け試験により各地点の粒度分布計測を行った。計測地点については Fig. 3.11, Fig. 3.12 に示すように横断方向に $y=5\text{cm}$, 15cm , 25cm , 35cm の 4 地点、縦断方向に 9 地点の合計 36 地点を基本とし、加えて粒度変化が特徴的に変化している地点についてはケース毎に追加して計測を行っている。なお、ふるい分け試験で用いたふるいの網目については Fig. 3.13 に示したものをを用いた。

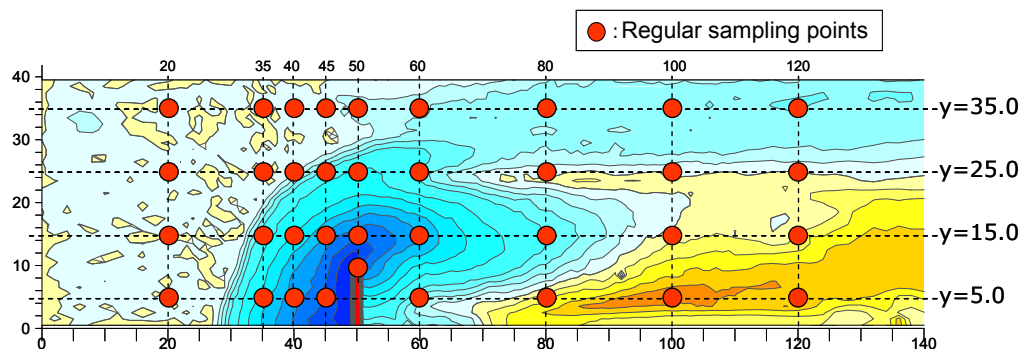


Fig. 3.11 河床表層粒度分布調査地点



Fig. 3.12 河床表層の粒度分布調査



ふるいの網目 (mm)
3.15
2.8
2.36
2.0
1.7
1.4
1.0
0.85
0.71
0.50
0.25
0.125
0.075

Fig. 3.13 計測で用いたふるい

▼3.2.6 流れ場の計測方法

本実験では水制周辺の河床変化および粒度変化と流れの3次元構造の関係を把握するために、移動床実験の代表ケースについて流速場の計測を行った。洗掘過程で変化する流速場を把握するために、初期河床である平坦河床と、今回の基準としている均一砂ケース(Case3)の最終洗掘河床において流れ場の計測を行った。本研究では、水制周辺の流れの3次元構造を把握することが重要と考え、表面流速および底面近傍流速、そして水制周辺の流れの3次元構造が把握できるようにいくつかの縦横断面の計測を行った。なお、計測器の流水投入の影響により河床が洗掘しないように、平坦河床および河床がほぼ平衡状態に達した通水3時間後の河床表面をセメントで固定して流速の測定を行っている。

鉛直断面と底面近傍の流速計測にはL型とI型の2成分電磁流速計（アレック電子社製）を用いた（Fig. 3.14）。Fig. 3.15のように水路上部を縦横断方向に移動可能な台車にポイントゲージを設置し、その先端に電磁流速計を固定し、台車によって流速計の平面方向位置を移動させ、ポイントゲージによって計測点の高さを変えながら点計測を行った。1地点について、20Hzでサンプリング数750の測定を行い、結果についてはその平均値を示している。



Fig. 3.14 I型・L型電磁流速計

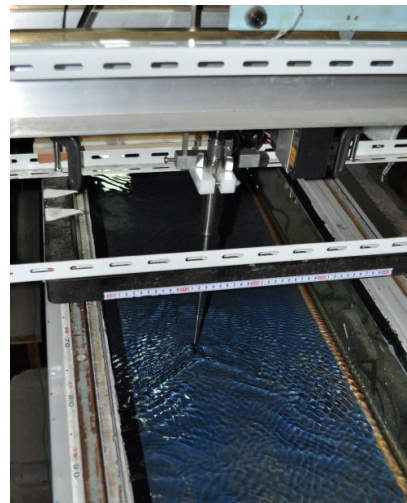
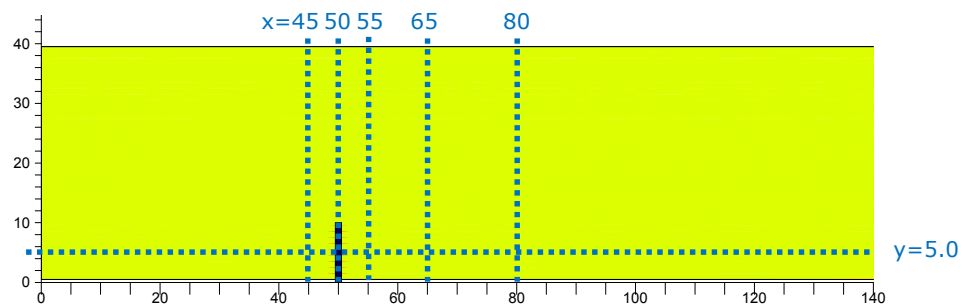
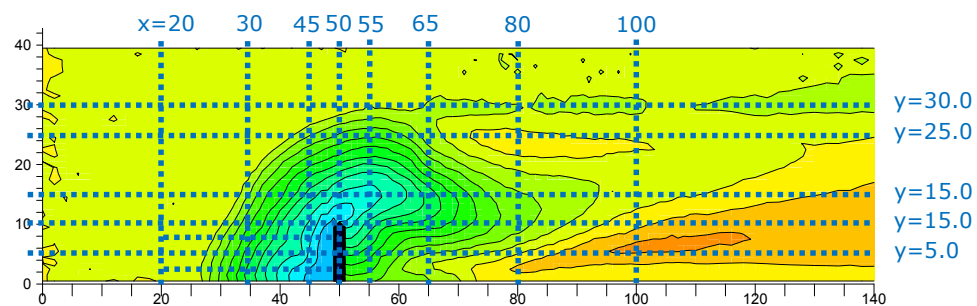


Fig. 3.15 電磁流速計による流速場計測

Fig. 3.16 には平坦河床ケースおよび洗掘河床ケースについて計測した鉛直断面の位置を示す。洗掘河床については洗掘孔周辺の渦構造が捉えられるように水制周辺を細かく測定している。Fig. 3.16 に示す断面においては、L型の流速計を用いて計測を行い、河床近傍の平面流速についてはFig. 3.17 に示す地点についてI型流速計を用いた。河床近傍の流速については計測器の構造上の制約から全地点において河床から1.5cmの高さを計測している。



(a) 平坦河床



(b) 洗掘河床

Fig. 3.16 流速計測断面

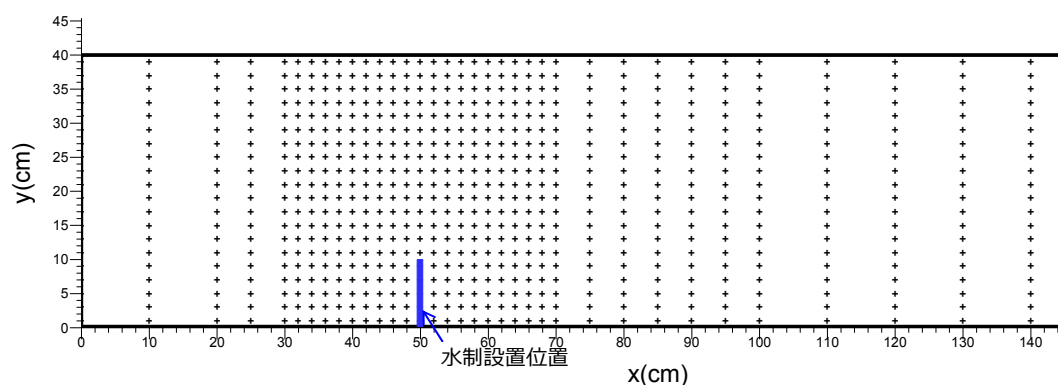


Fig. 3.17 底面近傍流速計測地点

また、表面流速については PIV (Particle Image Velocimetry)法により計測を行った。PIV 法とはデジタルビデオ等により撮影された映像を Fig. 3.18 に示すように正射投影化し、検査領域において連続した画像間でのトレーサーがつくる模様の類似性から、トレーサーの平均移動距離を求め、各検査領域に対し流速を求める手法である。本実験では、トレーサーとして平均粒径 $50\mu\text{m}$ 程度の PVC (ポリ塩化ビニル: polyvinyl chloride) 粉末を用いて水表面に模様を作成した。なお、解析には藤田ら³⁾によって開発されたプログラムを用いている。

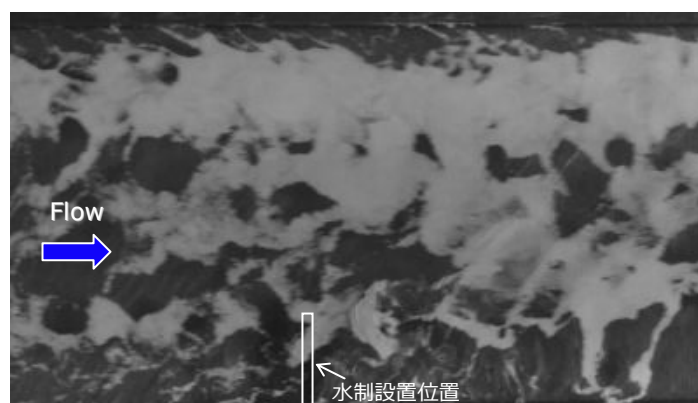


Fig. 3.18 正射投影化された撮影画像の例

3.3 実験結果とその考察

▼3.3.1 洗掘孔の拡大過程

全実験ケースにおいて、実験開始とともに水制先端近辺において河床洗掘が直ちに始まり、初期の洗掘孔が形成される。そして、水制頭部付近の河床低下の後に、水制前面の下降流がもたらす馬蹄形渦により、水制上流側において洗掘孔が大きく発達していった。Fig. 3.19 は、Case9 のカラーサンド

を用いた実験ケースにおいて水制工上流側の洗掘孔縁を上空から撮影した複数枚の画像よりトレースし、実験開始から 90 分後までの洗掘孔拡大の時間変化を示したものである。洗掘孔上流側については、上部から撮影した画像の洗掘孔縁位置を色の变化から捉えることが可能であったが、下流側については輸送されている砂の影響で撮影画像では洗掘域と堆積域の境を捉えることが難しかったため Fig. 3.19 は上流側のみの図示となっている。図示した全ての線は時間的に等間隔ではなく、わかりやすくするためにトレースした時間間隔毎に色を区別して示している。同じ色で線の間隔が広い箇所ほど洗掘孔の拡大速度が速いことを示している。

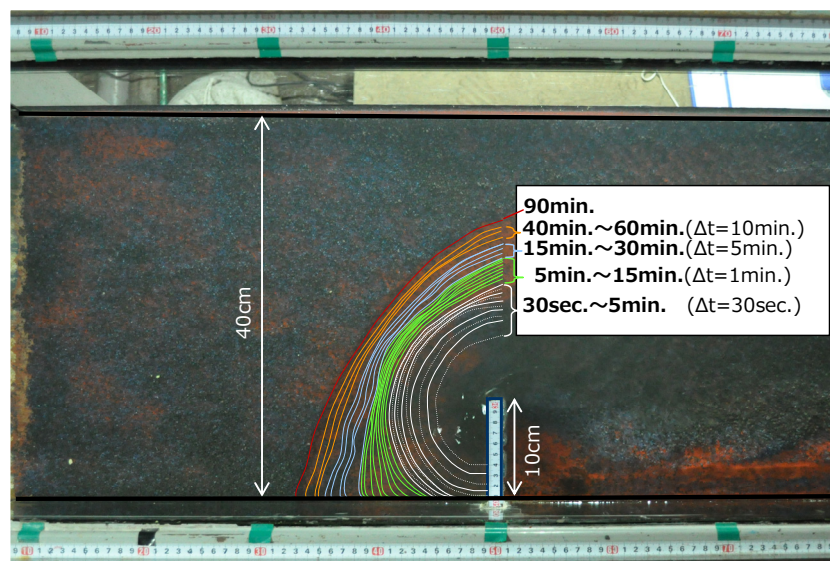


Fig. 3.19 水制上流側洗掘孔の拡大過程(Case9)

初期段階は砂粒が巻き上げられるように運ばれ洗掘孔の発達是非常に早く、水制頭部を中心とした同心円状で洗掘孔が発達していることが図の白線より確認できる。洗掘孔の拡大速度は、洗掘孔が大きくなるにつれて徐々にその速度を落としている。洗掘孔発達初期段階以外は、砂がずり落ちる現象により洗掘孔縁から内側へ砂が運ばれ、その後は洗掘孔内部の渦によって水制を迂回するように下流へ砂が運ばれている様子が確認できた。また、Fig. 3.19 から確認できるように、水制頭部を中心とした同心円状の洗掘孔が側壁に到達した約 5 分後以降は、側壁近くの洗掘孔拡大速度がその他の領域に比べて大きくなっており、90 分後には水制頭部を中心とした円ではなく上流側へ張り出した洗掘孔形状となっている。

▼3.3.2 均一砂と混合砂の河床形状

Fig. 3.20 は各均一砂ケースの通水 3 時間後のほぼ平衡状態に達した河床形状を示している。各ケースにおいて水制先端で洗掘が開始し、馬蹄形渦によって水制前面域および水制頭部周辺で大きな洗掘が生じており、後述する後流渦によって水制背後域へ輸送され堆積域が形成されている。

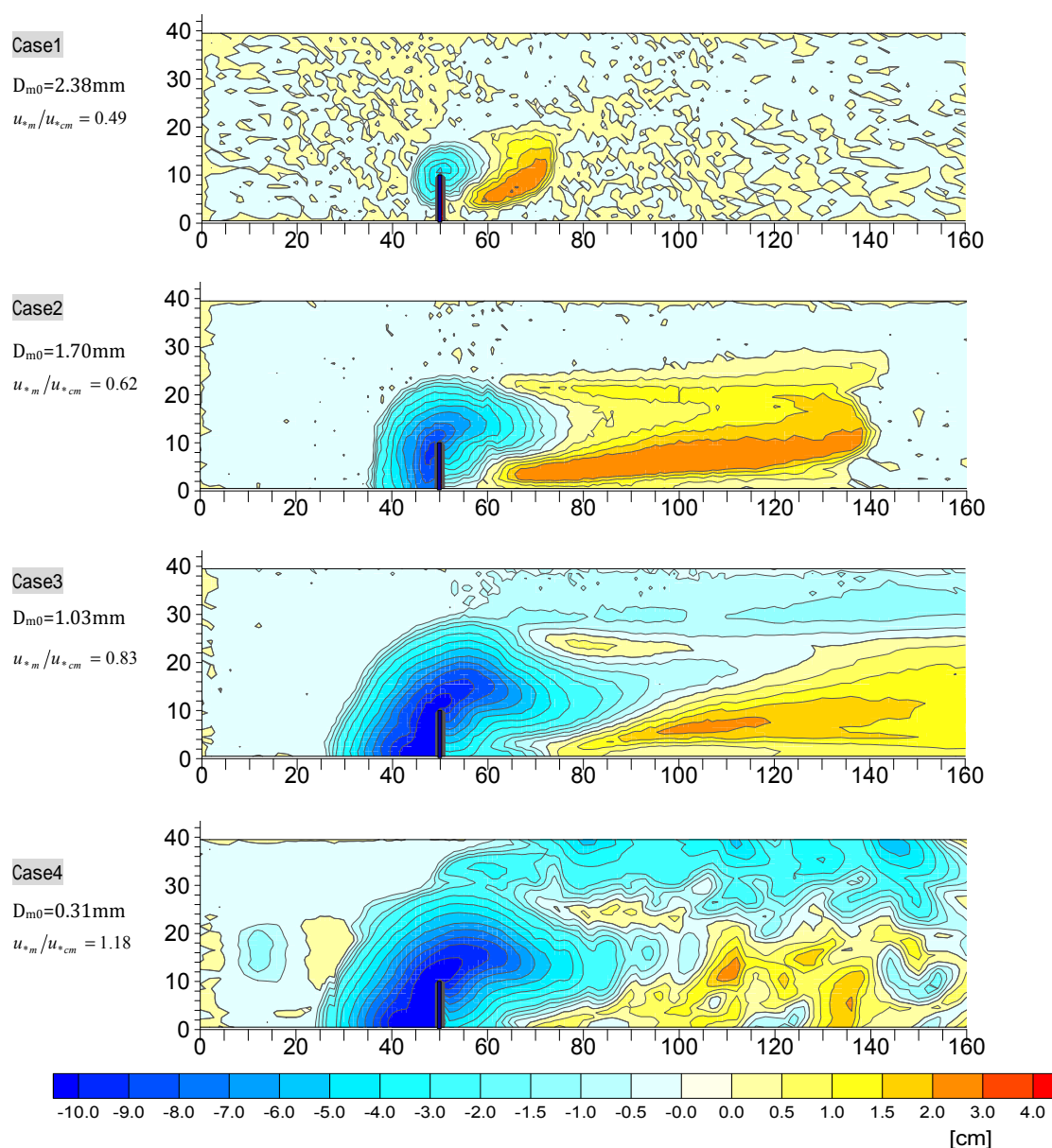


Fig. 3.20 通水 3 時間後の河床形状 (均一砂ケース)

均一砂ケースの移動床実験について、本研究で用いた河床材料の粒径範囲内では、平均粒径が大きくなればなるほど、最大洗掘深や洗掘孔の大きさが小さくなる傾向がある (Fig. 3.20, Fig. 3.21)。そして、Fig. 3.22 は均一砂ケースについて、最大洗掘深と摩擦速度と限界摩擦速度の比の関係を示したもので、本実験の結果を用いて単純な 2 次の近似曲線を描いた場合、摩擦速度と限界摩擦速度の比が 1.0 辺りで最大値を取るような曲線が描かれ、この図は Fig. 3.23 に示すの Chew⁴⁾が橋脚周りの洗掘実験で得られた図にとっても似ている。Chew らは、摩擦速度と限界摩擦速度の比が 1.0 以下の範囲は、その比が大きくなるにつれて最大洗掘深が大きくなり、1.0 近辺で最大値を取り、live-bed 状態となると一旦値が下がりまた上昇するような傾向を示しており、水制周辺の洗掘も同様な傾向を有していることが今回の結果から推察される。

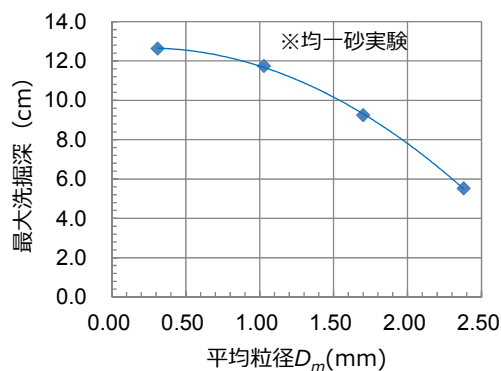


Fig. 3.21 最大洗掘深と平均粒径の関係

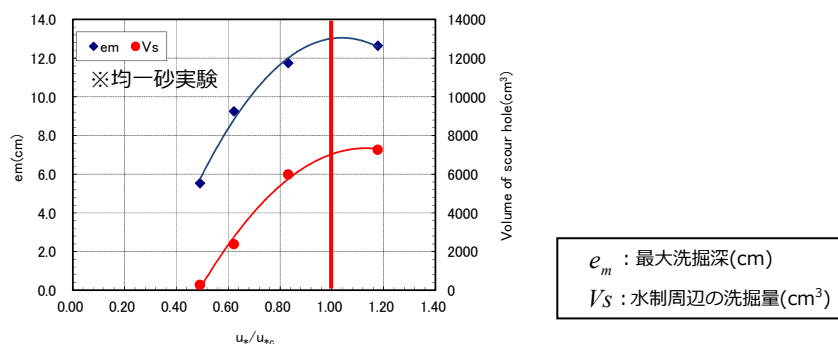
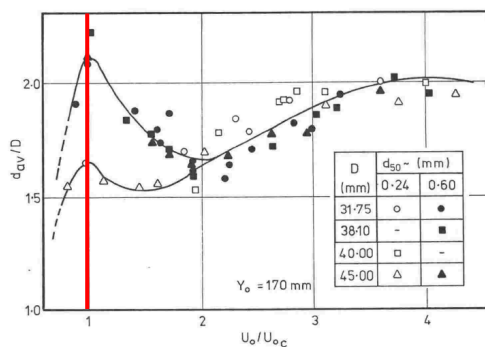


Fig. 3.22 最大洗掘深と摩擦速度・限界摩擦速度比の関係

Fig. 3.23 Chew の最大洗掘深と摩擦速度・限界摩擦速度比の関係⁴⁾

河床勾配については、Fig. 3.24, Fig. 3.25 に示すように洗掘深が小さいほど洗掘孔の河床勾配が急になる傾向が確認され、均一砂ケースの実験において平均粒径が大きいほど河床勾配が大きくなると言えそうである。洗掘孔の水制設置下流側の河床勾配は、上流側および横断方向に比べて河床勾配が緩いことが特徴的で、水制周辺の河床近傍流れの向きとその大きさが河床勾配に影響していると考えられる。水制周辺の流れ場については後述する。また堆積域については、平均粒径が大きいほど下流へ

は流されず水制近くに堆積する傾向が見て取れる。また Case4 については、他ケースと異なり掃流力が限界掃流力以上となり、水制下流側において live-bed 状態となり、河床波が形成され水制下流側の河床形状が複雑になっている。しかし、live-bed 状態であっても水制背後域で河床が高くなる傾向は clear-water のケースと同じである。

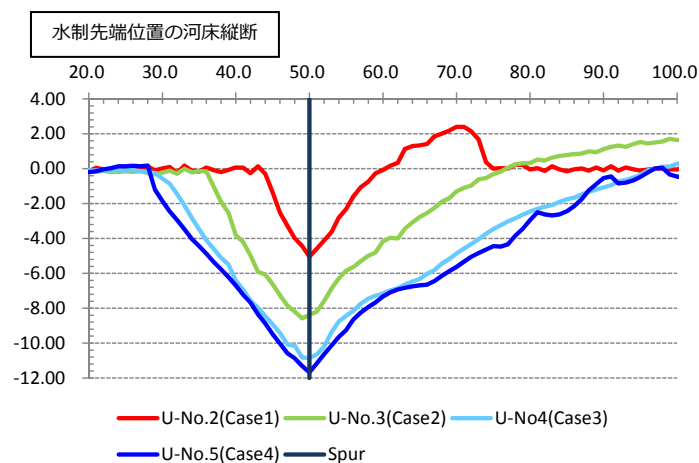


Fig. 3.24 均一砂ケースの縦断河床形状

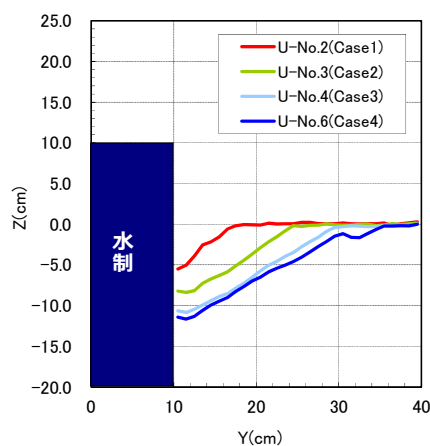


Fig. 3.25 均一砂ケースの横断方向の河床形状

Fig. 3.26 には混合砂ケースの通水 3 時間後の河床形状を示している。平均粒径が同等で粒度分布の異なる混合砂河床を用いて得られた水制周辺の洗掘孔形状は、各ケース相似形で似ている部分が多い。そこで、ケース間の違いを明らかにするために、Fig. 3.27 に示す洗掘孔の寸法等を Table 3.5 に整理した。初期河床粒度分布と洗掘深の関係は次節で考察する。

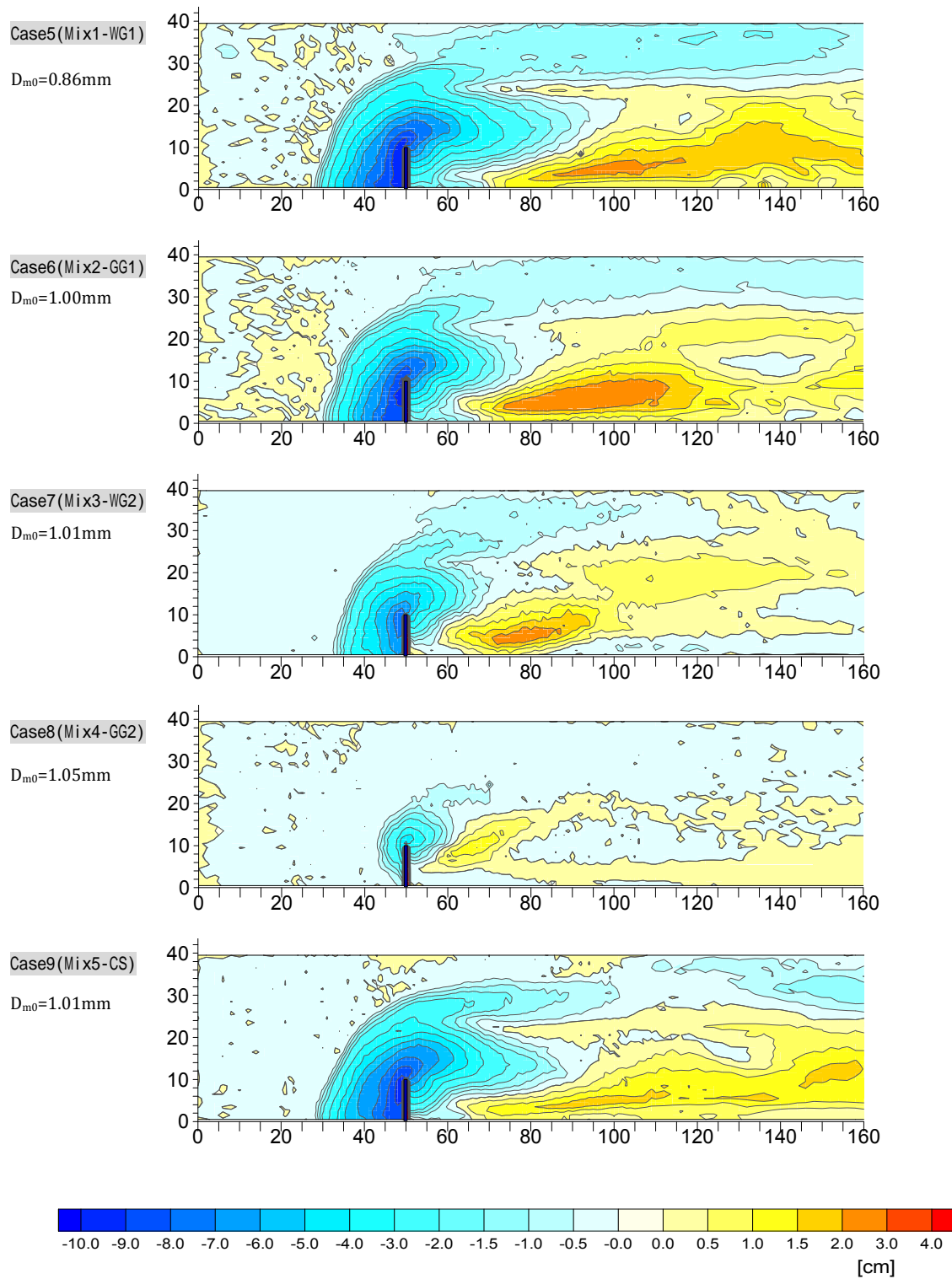


Fig. 3.26 通水3時間後の河床形状（混合砂ケース）

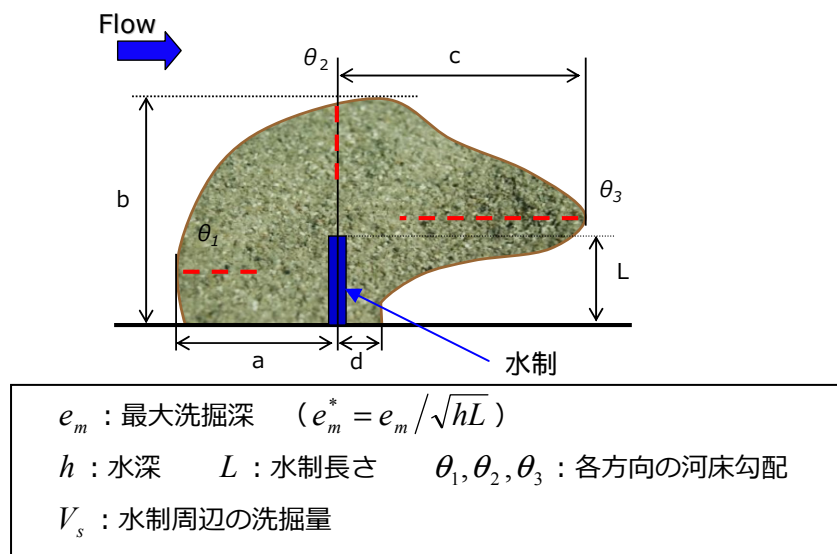


Fig. 3.27 洗掘孔の略図

Table 3.5 各ケースの洗掘孔の寸法

Case No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Case Name	U-2	U-3	U-4	U-6	Mix-WG1	Mix-GG1	Mix-WG2	Mix-GG2	Mix-CS
a/L	0.6	1.4	2.1	2.4	2.1	1.9	1.6	0.7	2.1
b/L	1.6	2.3	2.9	4.0	3.0	2.9	2.2	2.0	3.0
c/L	0.9	2.1	4.0	3.9	3.7	2.3	1.6	1.0	3.7
d/L	0.0	0.0	1.4	1.4	0.9	0.4	0.0	0.0	1.0
θ_1	39°	34°	27°	27°	22°	26°	21°	34°	20°
θ_2	39°	33°	31°	29°	25°	26°	21°	27°	24°
θ_3	25°	17°	12°	14°	10°	16°	17°	16°	12°
e_m (cm)	5.5	9.2	11.7	12.6	9.6	9.2	7.5	5.3	9.3
e_m^*	0.78	1.31	1.66	1.79	1.36	1.31	1.06	0.75	1.32
V_s (cm ³)	268	2378	5978	7262	4532	3210	1964	353	4026
D_{m0} (mm)	2.38	1.70	1.03	0.31	0.86	1.00	1.01	1.05	1.01
σ_g	1.48	1.19	1.14	1.44	2.36	2.62	3.62	4.30	2.55
d_{90}	2.86	2.07	1.13	0.33	1.74	1.81	2.13	2.50	1.80

▼3.3.3 最大洗掘深と粒度分布の関係

混合砂ケースについては、平均粒径が同等のケースを比較した場合、Fig. 3.28 に示すように、河床材料の粒度分布の範囲が狭く幾何標準偏差 σ_g が最も小さく均一砂に近いケースの最大洗掘深および洗掘量が最も大きく、粒径範囲が広く σ_g が大きいほど洗掘が小さくなり、その差は非常に大きい。本

実験条件範囲内においては最大で最大洗掘深が 2.2 倍もの差が生じる実験結果となった。また、本実験の粒径条件においては σ_g と逆の相関でほぼ線形関係にあることが示され、水制周辺の洗掘規模を評価する上で σ_g が重要なパラメータであることが示された。

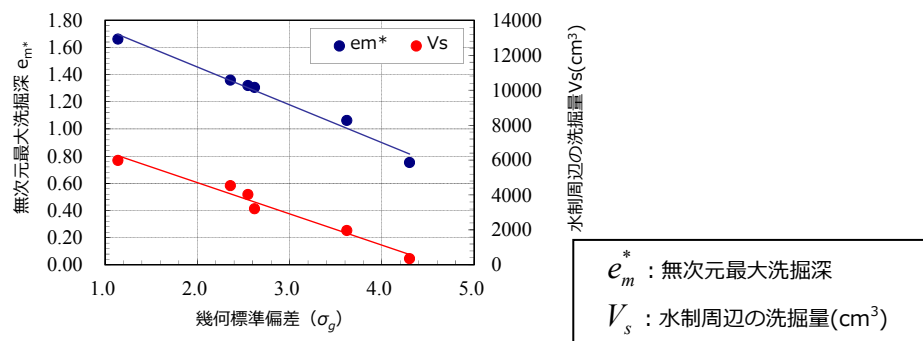


Fig. 3.28 最大洗掘深・洗掘量と σ_g の関係

均一砂に比べ混合砂の洗掘が小さくなる原因は、洗掘過程において洗掘孔内の細粒分が流れによって輸送され易く大きな砂粒は輸送され難いという移動限界の違いから、洗掘が進むにつれて大きな砂粒が河床表層に存在する割合が徐々に増加し、最終的に河床底部でアーマ・コートが形成され、洗掘が軽減されたと考えられる。均一砂の場合には文字通り粒径が均一であるためアーマ・コート形成が不可能な故に洗掘は軽減されず、Fig. 3.28 に示すように均一砂に近いほど洗掘深が大きくなる傾向が説明できる。Fig. 3.29 にはカラーサンドを用いた Mix-CS ケースの通水後の水制周辺河床表層を示し、水制前面と頭部の洗掘孔底部において粗粒化が進み、黒い砂が多く存在しアーマ・コートが形成されていることが確認できる。そして Fig. 3.30 には各混合砂ケースの水制先端地点の粒度分布計測結果を示しており、全混合砂ケースにおいて、洗掘する過程で河床表層の細粒分が減少し、粗粒化が進んだ状況が粒度分布計測結果からも確認できる。また、Fig. 3.31 は同じ地点の各ケース粒径別の存在割合を示す。この図よりふるい目が概ね 1.7mm 以上の粒径が通水後に増加傾向を示し、粒径 1.7mm 以下の砂粒は減少していることが確認され、本実験条件では 2mm 程度の大きな粒径でアーマ・コートが構成されていること確認できる。

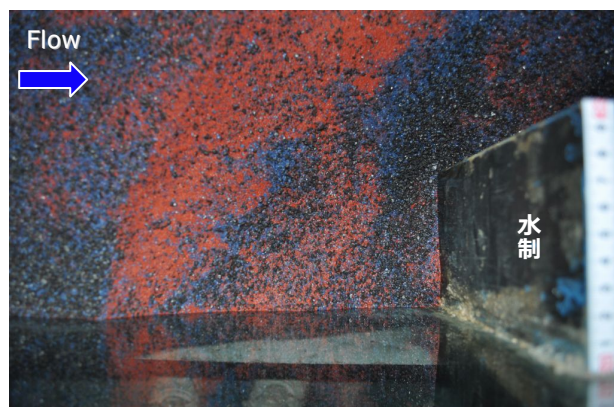


Fig. 3.29 Mix-CS ケースの水制周辺河床の粗粒化

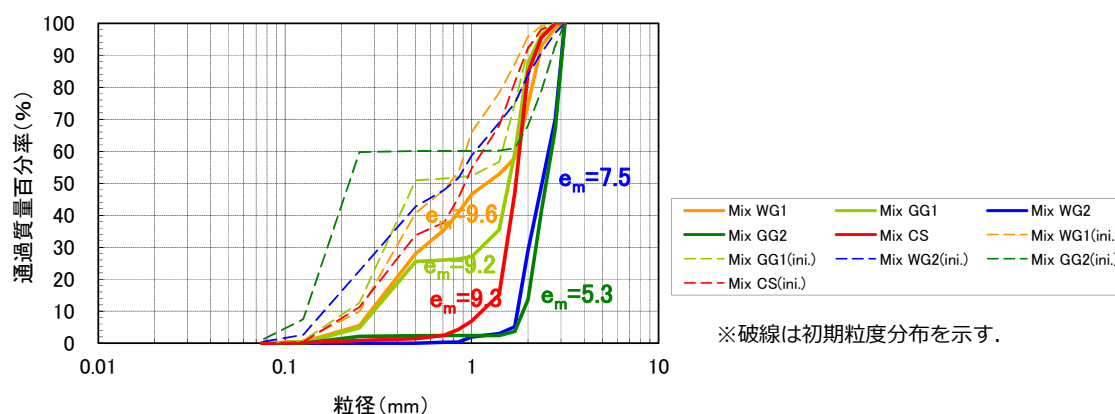


Fig. 3.30 水制先端周辺の河床表層粒度変化

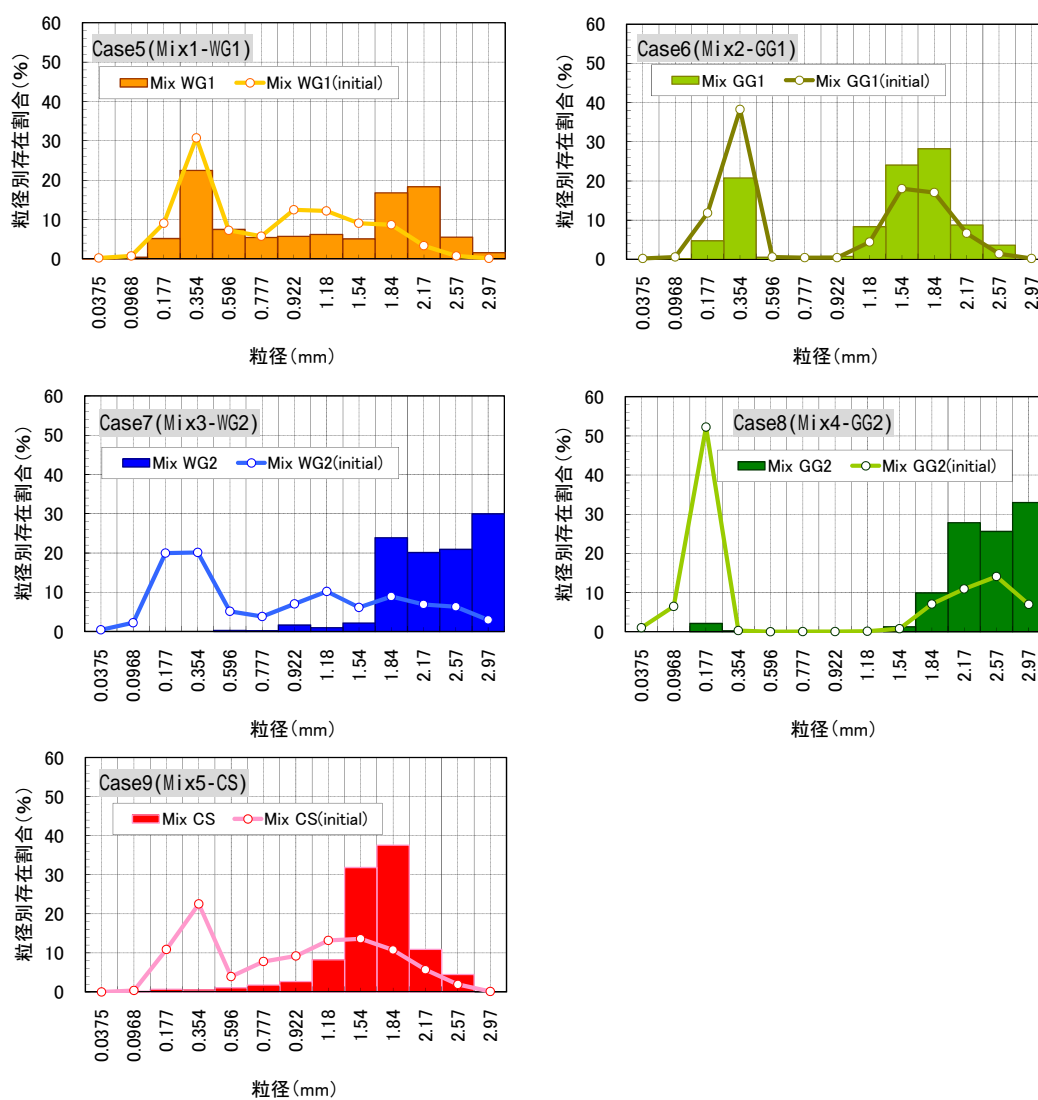


Fig. 3.31 河床表層の粒径別存在率の変化 (ケース別)

水制近傍の掃流力は、洗掘が進み洗掘孔が拡大するにつれて小さくなると考えられるが、洗掘の軽減には洗掘ステージの掃流力に見合った粒径でアーマ・コートを形成する必要がある。より大きな砂粒によって河床表層が覆われれば、より小さな洗掘深における大きな掃流力に耐えうるアーマ・コートとなり、洗掘の進行を止めることができると考えられる。従って、洗掘深軽減には、その洗掘ステージの掃流力に見合った粒径で構成されるアーマ・コートを、洗掘が進行しながら河床底部にどれだけ早く形成できるかが重要と考えられる。

本実験の混合砂ケース内において σ_g が大きくなるにつれて洗掘が小さくなる理由については、平均粒径が同等の条件においては σ_g が大きい程アーマ・コートとなり得るより大きな粒径の初期に存在する割合が大きくなるためだと考えられる。Fig. 3.32 に本実験の混合砂河床の初期条件における粒径2mm以上の存在率と最大洗掘深の関係を示す。この図より σ_g が大きくなるにつれて本実験でアーマ・コートとなり得る粒径の初期に存在する割合が多くなっていることが確認できる。より大きな粒径が初期に多いほど洗掘が進む過程においてアーマ・コートが早く形成され、洗掘が抑えられる。幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$ の値が大きくなるためには、 d_{84} が大きくなるか d_{16} が小さくなる二通りのケースが考えられるが、本実験の混合砂河床の作成条件である平均粒径が同じという縛りにおいて、 d_{84} を大きくするために大きな砂粒の割合を多くすれば、平均粒径を同じにするためにその分小さな粒径の割合も多くする必要がある。大きな砂粒が多くても、より小さな砂粒の割合も多くなれば洗掘の程度はあまり変化しないと考えてしまうところだが、洗掘するかどうかは河床表層の薄い層の粒度分布にのみ依存するため、初期に存在する小さな粒径の割合より大きな粒径の存在率が水制周辺の洗掘深軽減で重要になる。従って、Fig. 3.28 に示すように σ_g が大きなケースほど洗掘が小さい結果となった。Case8(Mix4-GG2)は本実験ケース内で最も極端に粒径が小さいものと大きなものを混合したケースで、洗掘深が最も小さくなったのはアーマ・コートに成り得る大きな粒径の割合が他ケースに比べ多いため、アーマ・コートが早く形成され洗掘の進行が妨げられた。次に最大洗掘深の小さなCase7(Mix3-WG2)は、粒度分布が連続的で分布が滑らかでありCase5(Mix-WG1)の粒度分布と似ているが、2mm以上の粒径の割合がCase7の方が多く、Case5に比べてアーマ・コートが早く形成されたと考えられる。

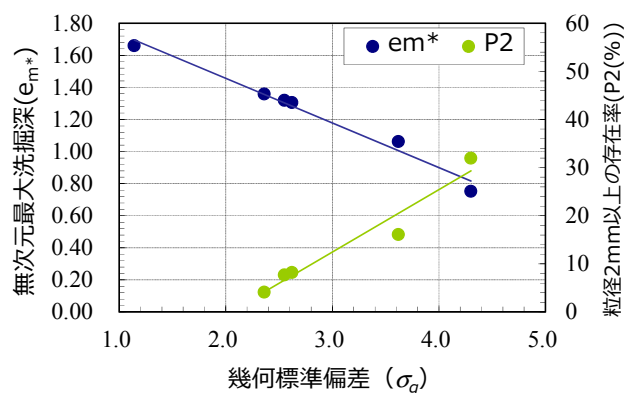


Fig. 3.32 幾何標準偏差と粒径2mm以上存在率の関係

水制下流の堆積域の違いについても、混合砂河床の粒度分布の違いの影響が良く表れている。Fig. 3.20 の均一砂ケースの河床高コンターから確認できるように、粒径の小さな砂粒の方が Step length は小さく移動速度は小さいが、大きな砂粒に比べ堆積高が小さく、より下流遠くへと流送されやすい傾向がある。その粒径による流送距離の違いが混合砂ケースの堆積域形状の違いへと表れている。例えば 2mm 以上の大きな粒径の割合が大きい Case7 および Case8 は堆積域が水制に近く、Case6 については Case7 と Case8 に比べると若干粒径が小さな 1.4mm～2.0mm 範囲の砂粒が 50%程度と多いため Case7, Case8 より堆積域が下流側へとシフトしている。また連続粒度混合砂の Case5, Case7, Case9 については、粒径範囲が広いために縦断方向に長く堆積域が作成された結果となっている。このように洗掘箇所の粒度分布の違いにより水制背後の堆積域の縦断方向の長さが異なってくることが確認された。

▼3.3.4 非越流型水制周辺の流れの構造

(平坦河床上の流れの構造)

平坦河床における流速ベクトルの縦断図を Fig. 3.33 に、横断図を Fig. 3.34 に示す。そして Fig. 3.35, Fig. 3.36 に底面付近の流速ベクトル, Fig. 3.37 には PIV 解析より求めた表層の流速ベクトル図を示す。

平坦河床上の流れの特徴としては、水制先端部で左岸側へ水が刎ねられ、下流側で水制域へ戻る湾曲した流れの構造となり、それに伴って本実験では $x=75$ 辺りに鉛直方向に軸を持つ平面的な循環渦、そして、その大きな循環渦とは逆回転のゆっくりとした小さな平面渦が水制背後に発生している (Fig. 3.36)。Fig. 3.36, Fig. 3.37 より、表層と底層の流速ベクトルの向きは概ね一致しているが、水制による水刎ね効果が低層よりも表層で強い傾向が確認できる。また、水制背後の平面渦の中心は、表層底層でほぼ同じ位置に存在し、本実験では、水制設置位置より下流へ水制長の 2 倍 ($2L$) 程度、右岸側壁からは $0.7L$ の位置に渦の中心が位置している。そして縦断および横断図で確認できる流れの向きはほぼ底面および表層の流速ベクトルと一致していることから、非越流型水制周辺で洗掘のない平坦河床においては流れの 3 次元性はそれほど強くないことが確認できる。

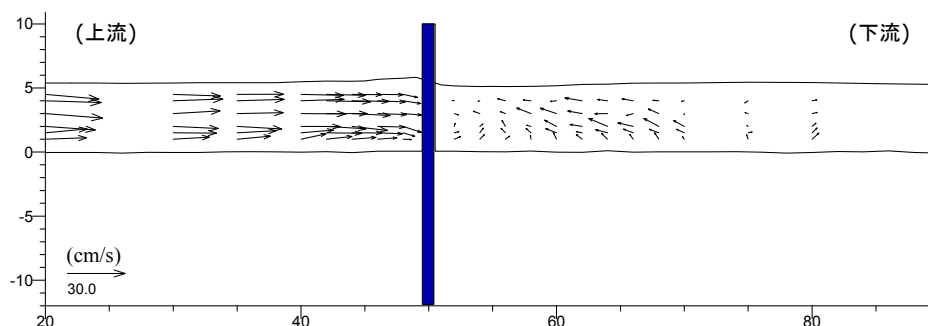


Fig. 3.33 $y = 5$ 縦断面 (u, w) 流速ベクトル図 (平坦河床)

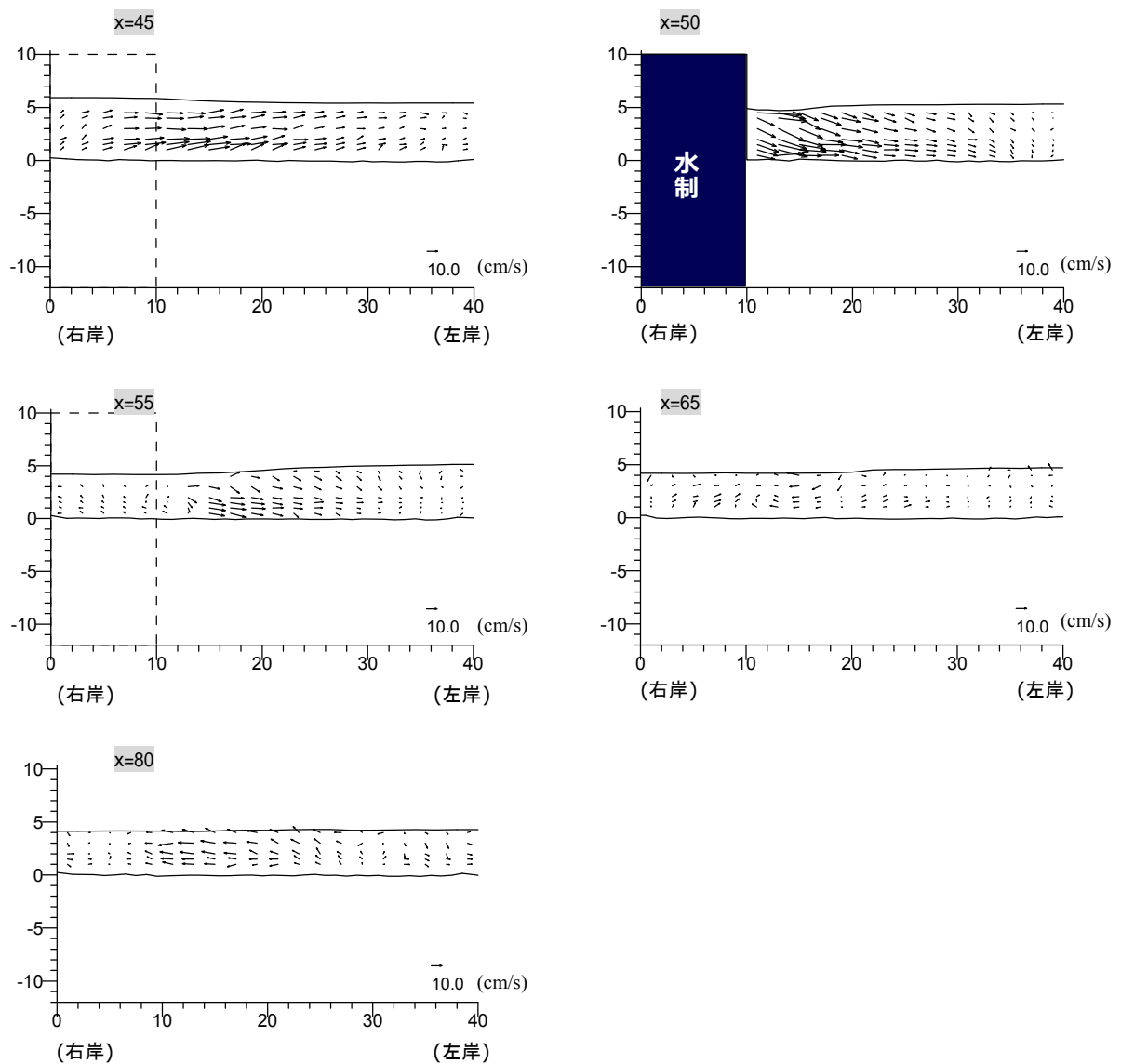
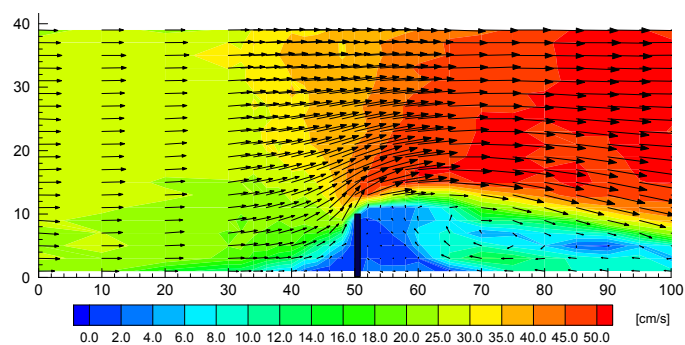
Fig. 3.34 横断面 (v, w) 流速ベクトル図 (平坦河床)

Fig. 3.35 平坦河床における底面付近の流速ベクトル

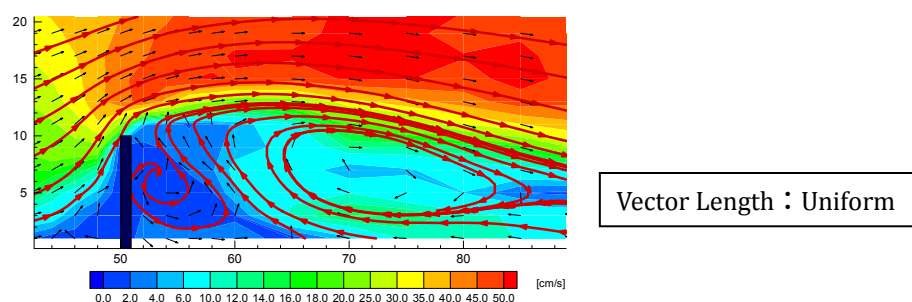
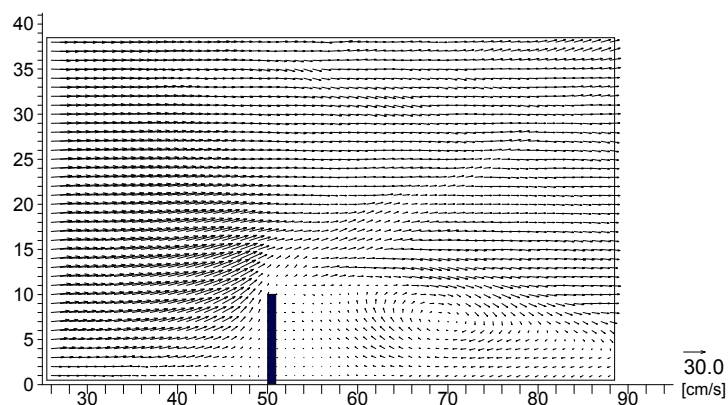
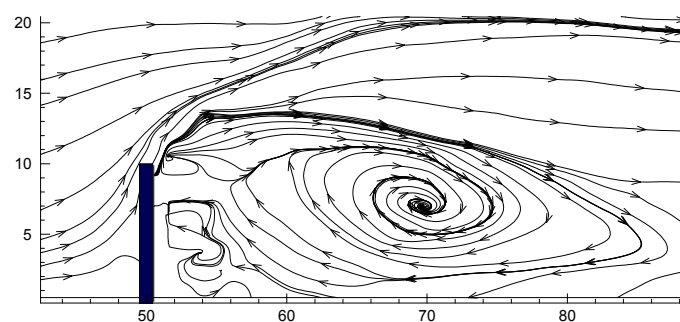


Fig. 3.36 平坦河床における底面付近の流速ベクトルおよび流線（水制下流側拡大図）



(a) 流速ベクトル



(b) 流線図（水制下流側拡大図）

Fig. 3.37 PIV 法より解析された表面流速ベクトルおよび流線図（平坦河床）

（洗掘河床上の流れの構造）

洗掘河床上の流れにおいて電磁流速計で計測した時間平均流れ場の計測結果を次に示す。Fig. 3.38 には縦断面，Fig. 3.39 には横断面の流速ベクトル図を示す。これらの縦断面，横断面と後に示す底面近傍の流速場，そして表層流れの PIV 解析によって洗掘河床上の水制周辺の流れの 3 次元構造を把握することに努めた。平坦河床の計測場では見られなかったいくつかの縦渦が存在し，水制設置位置より下流においても複雑な流れを呈していることが確認できる。

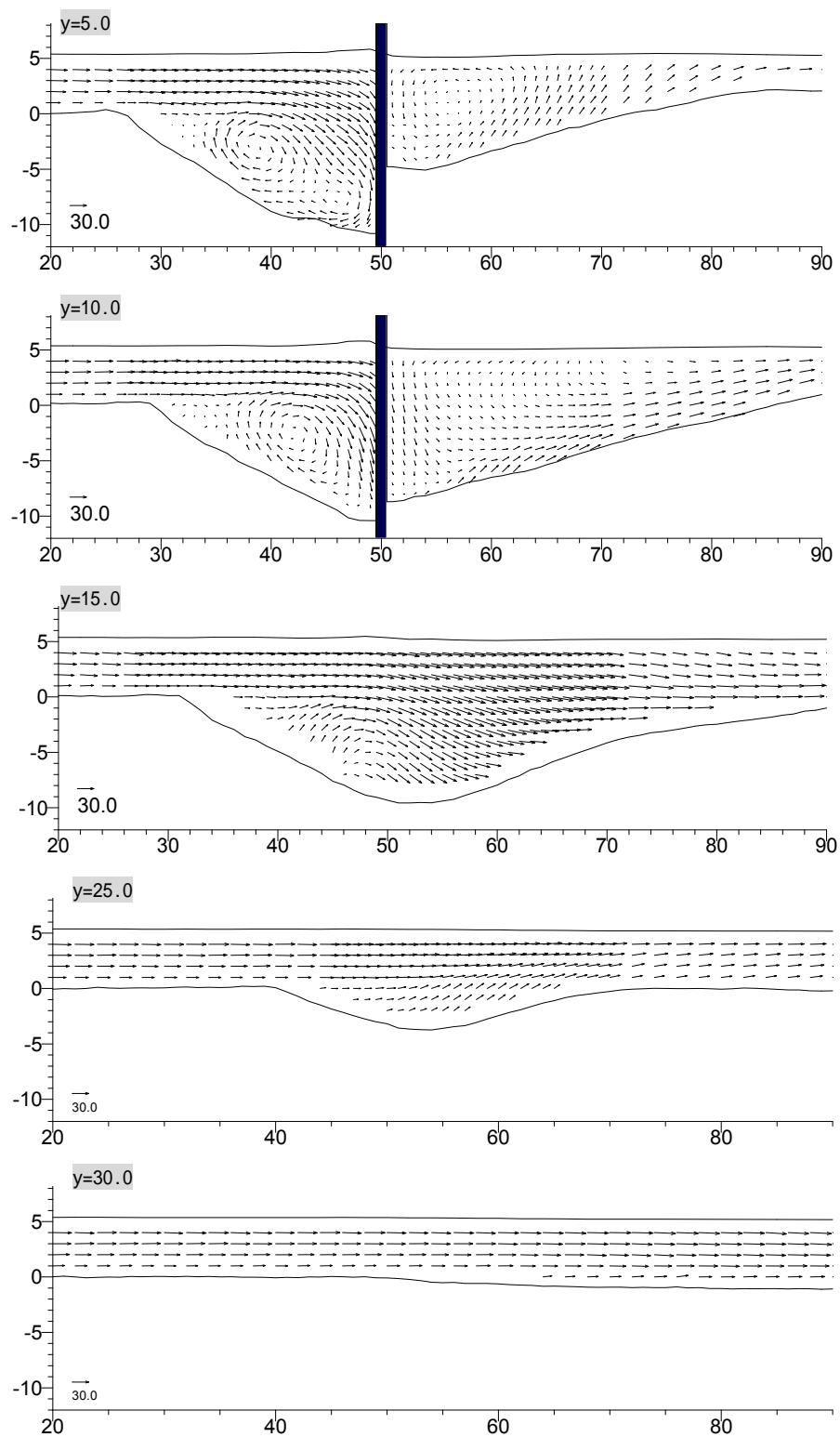


Fig. 3.38 縦断面 (u, w) 流速ベクトル図

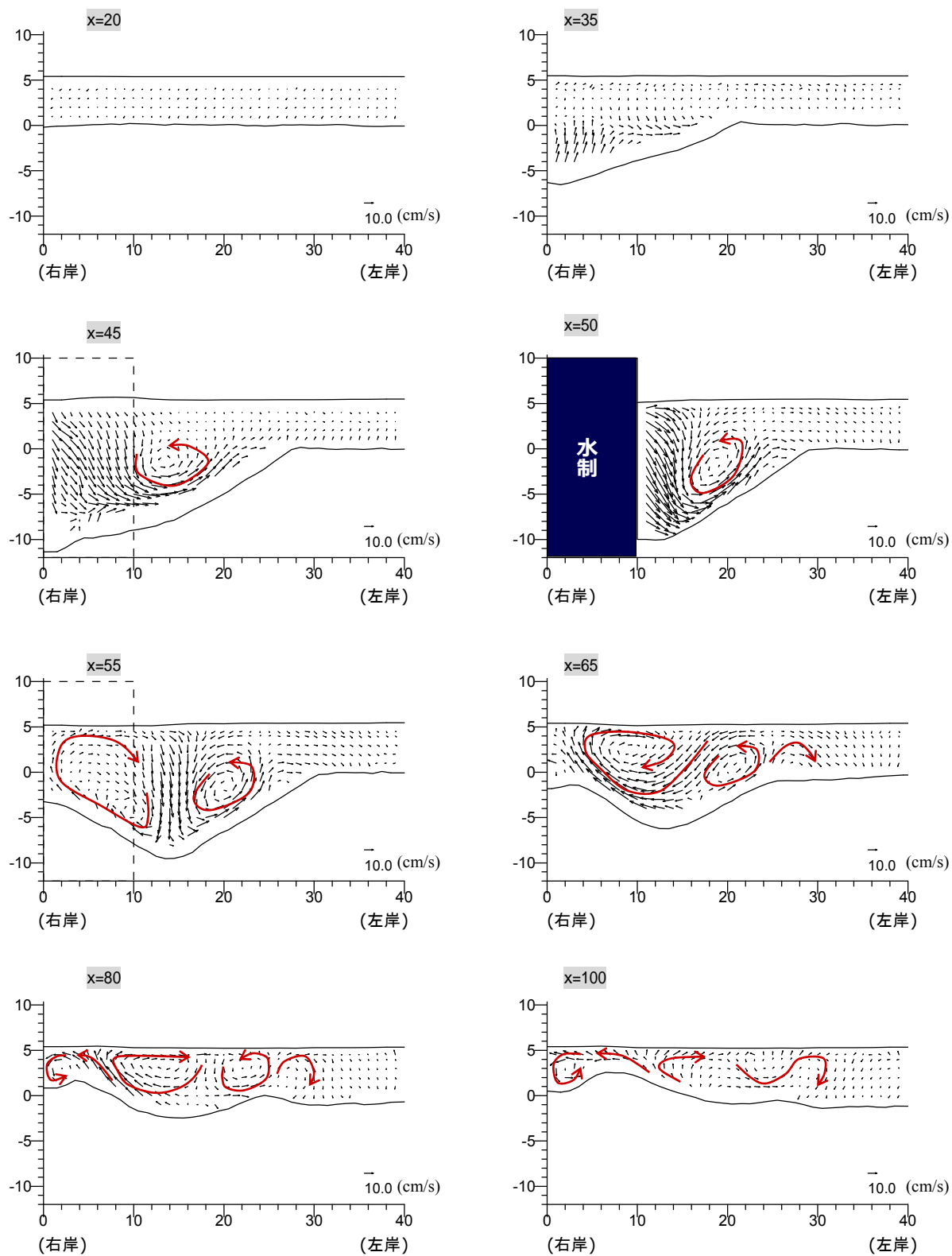


Fig. 3.39 横断面(v, w)流速ベクトル図

Fig. 3.40 は $y=5$ の縦断面について中立浮遊粒子（ポリスチレン粒子）とハロゲンファイバー照明装置（LS-LHA，株式会社住田光学ガラス）を用いて流れを可視化し撮影した写真を示し，Fig. 3.41 には水制前面の洗掘孔内の縦断面について横断位置を $y=2.5, 5.0, 7.5, 10.0$ と変更して計測した流速ベクトル図を示す．可視化画像と計測結果より確認できるように，水制前面において表層と底層の圧力勾配により下降流が発生し，その下降流によって水制前面から馬蹄形渦が発生しており，電磁流速計の計測により，この馬蹄形渦が良くとらえられていることがわかる．Fig. 3.41 の $y=2.5, 5.0, 7.5$ 縦断面において，同方向の渦が重なって2つ存在し，上流側の渦の中心は初期河床より低い位置に存在し，右岸側壁に近いほど水制から遠く上流側に位置し，水制頭部 $y=10.0$ 断面ではその渦が重なって1つになっていることが確認できる．Fig. 3.42 には水制前面洗掘孔内の鉛直流速を横断位置で比較した図を示す．側壁から離れ水制先端へ移動するにつれて，下降流域の範囲が狭くなることがこの図より確認でき，そして下降流の大きさは，水制直上流域で水制頭部へ近づくにつれて若干大きくなる傾向が確認できる．また渦による上昇流については，横断位置の違いで大きさは然程変化しないようであるが，上昇流範囲の幅が水制先端へ向かうほど若干広くなる傾向が確認できた．

水制前面から洗掘孔の端に沿って迂回し下流に伸びる馬蹄形渦は，Fig. 3.39 の横断図より下流に行くにつれて徐々に弱まり渦が消滅する様子が確認できる．水制背後の後流は，水制頭部の強い下降流によって底層で水制背後に入り込む流れが発生し，馬蹄形渦と逆回転の渦（後流渦）が発生している ($x=55, 65$)．その馬蹄形渦と後流渦にはさまれる領域は，顕著な下降流域となっており，そしてその底部においては，横断面の最深部から地形を上るように両側へ流れが分かれていることが確認できる．この後流渦による河床近傍で水制背後へ向かう流れが水制背後に土砂を運ぶ駆動力となっており，馬蹄形渦に関しても同様に，水制設置位置より下流の $y=25$ 近辺の縦断方向に延びる若干の堆積域の発生原因となっていることが考えられる．また $x=80, 100$ 断面においては，後流渦から誘発されるような形で側壁近くに小さな第3の渦が発生していることが確認された．この3つ目の渦は，本実験の多くのケースで見られた水制背後の堆積域の峰が側壁から若干内側に位置する原因であると考えられる．

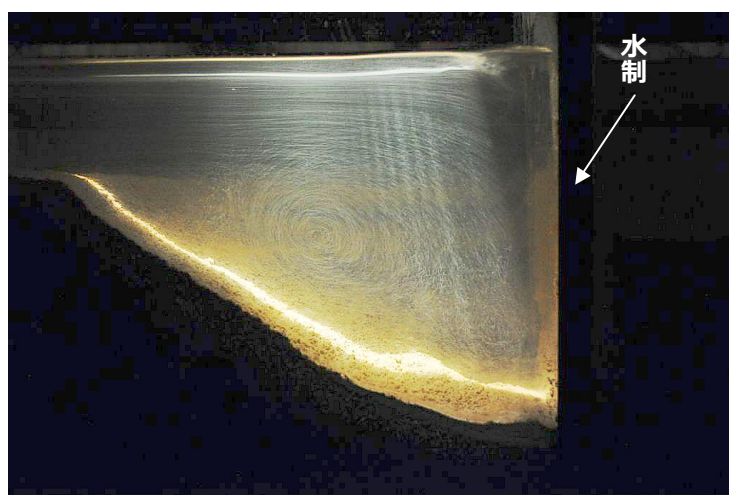
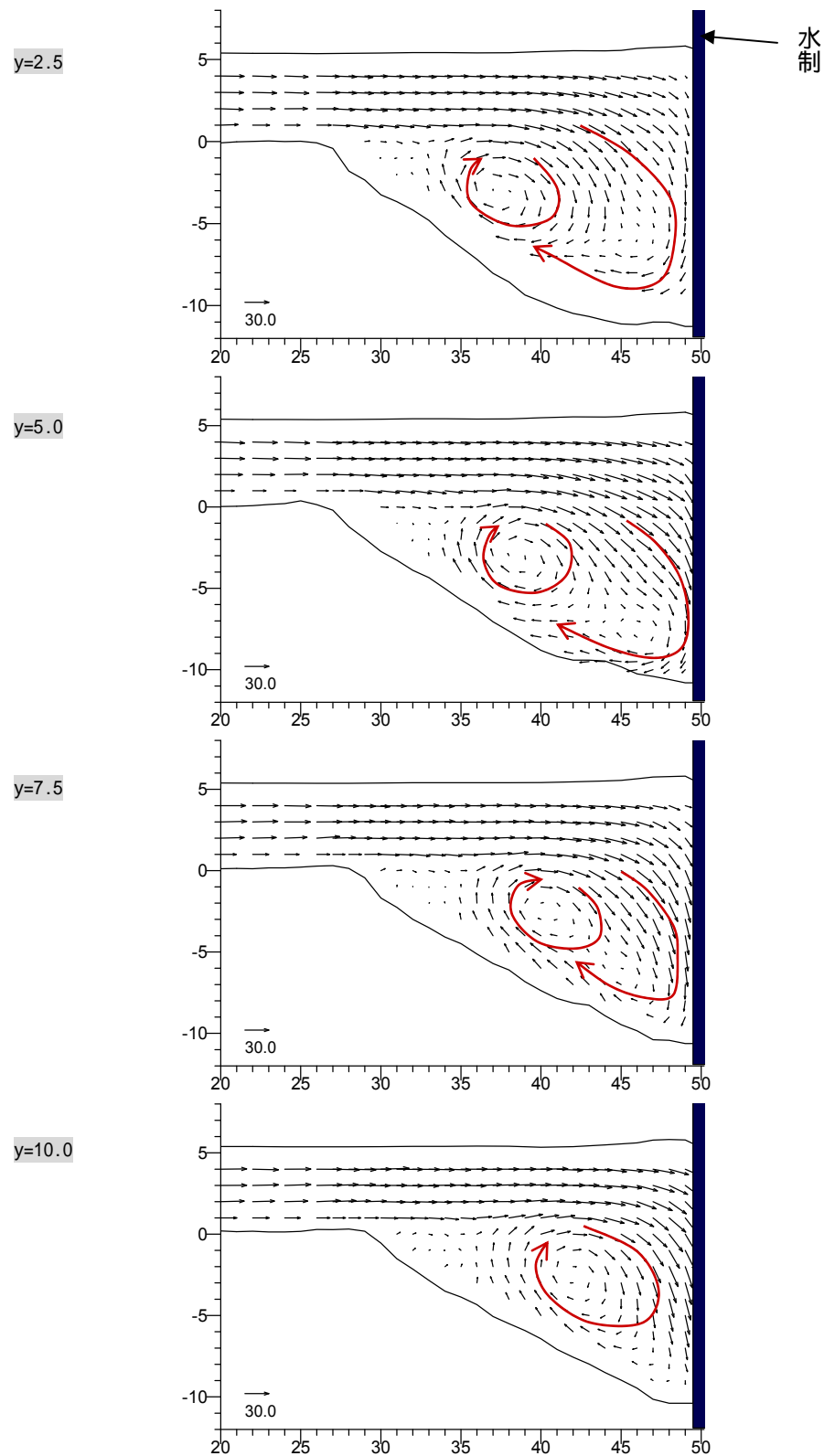


Fig. 3.40 中立浮遊粒子による水制前面の馬蹄形渦の可視化画像

Fig. 3.41 縦断面(u, w)流速ベクトル図

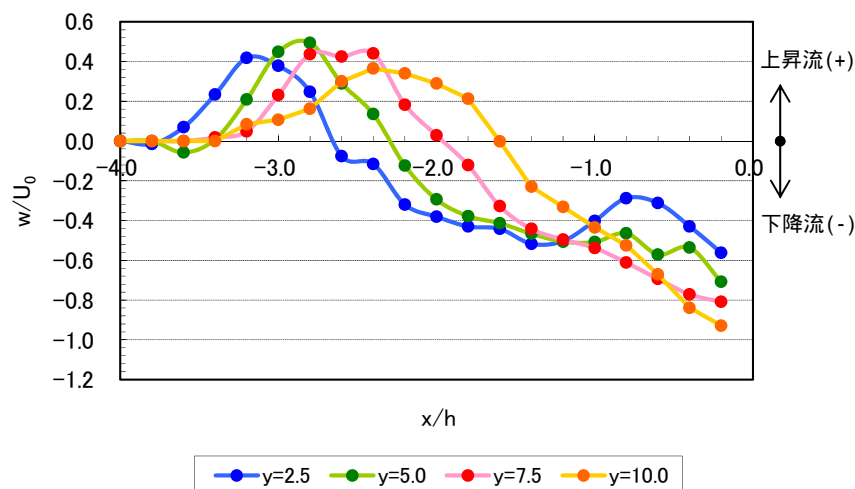


Fig. 3.42 水制前面における鉛直流速の比較

Fig. 3.43 には底面付近の流速ベクトルおよび流速コンター図を示す。水制前面の側壁から水制頭部にかけて、馬蹄形渦により河床近傍において洗掘孔の縁に向かう流れが発生している。そして、水制先端下流側では、水制先端付近の横断位置から左右に分かれるような流れが河床近傍で存在し、これは先述した馬蹄形渦と後流渦によってもたらされている。水制背後域および洗掘孔内の河床近傍流速は相対的に小さく、水制先端から下流へ向かって徐々に流速が増加し、舌状に流速が大きくなっていることが特徴的である。また、赤線で囲んだ $y=23\sim 27$ の範囲については、横断面 $x=65, 80$ (Fig. 3.39)、縦断面 $y=25$ (Fig. 3.38) より確認できるように、馬蹄形渦によって幾分上向きの流れが続く領域で、河床近辺において流速が相対的に周囲より小さくなっていることが明らかとなり、非越流型水制周辺における洗掘河床の流速場として特徴的である。

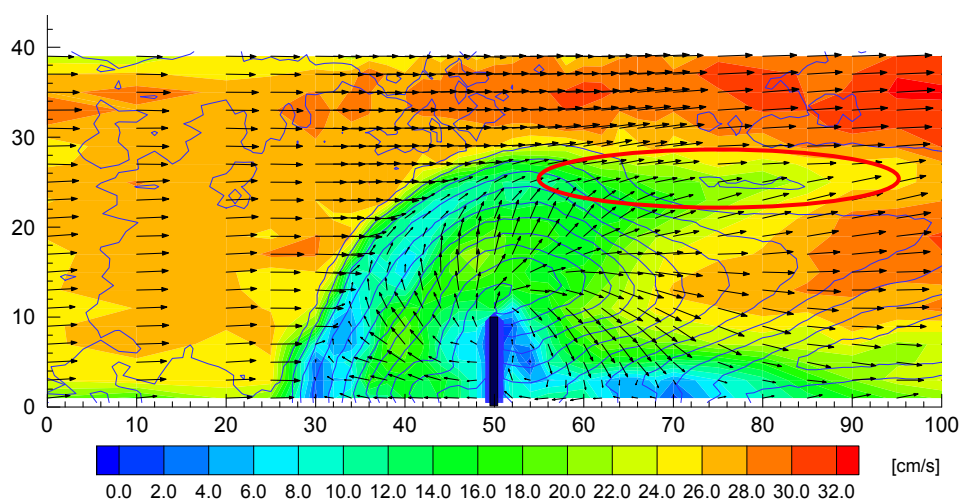
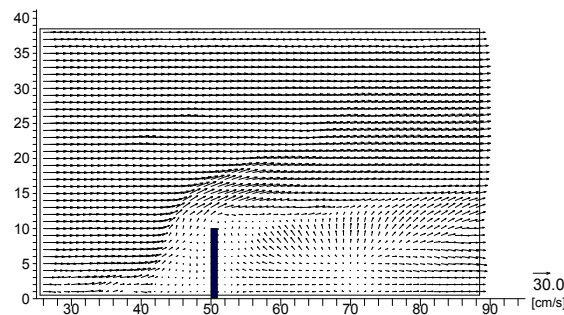


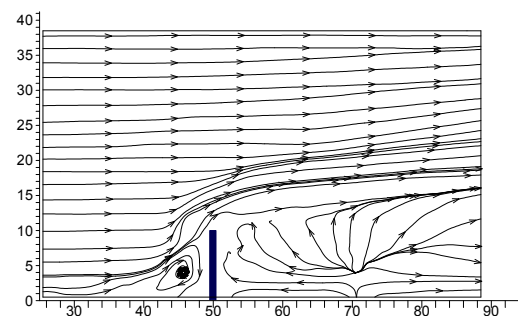
Fig. 3.43 底面付近の流速ベクトルおよび流速コンター図

(洗掘河床上の表面流速)

Fig. 3.44 に PIV 法により解析された表面流速ベクトルおよび流線図を示す。平坦河床上の流れと同様に水制頭部域において流線の集中が見られ、表層流れからも水制頭部域で下降流が発生していることが推測できる。平坦河床上の表層流れと大きく異なるのは水制背後の領域で、水制前面や先端から下層へ潜り混んだ流水が Fig. 3.39 ($x=65$) から確認できるように河床地形を上り、平坦河床では渦中心であった $x=70$ 辺りに湧昇域を作成している。Fig. 3.43 の底面流速場から確認できるように、水制頭部から $x=70$ の右岸側壁へ向かう流れとなっており、側壁領域で流速が減少していることからその領域で流水が湧昇している様子がうかがえる。そして、表層では $x=70$ を中心に扇型の放射線状の流れとなっていることが、洗掘河床上における表層流れ場として特徴的である。



(a) 流速ベクトル

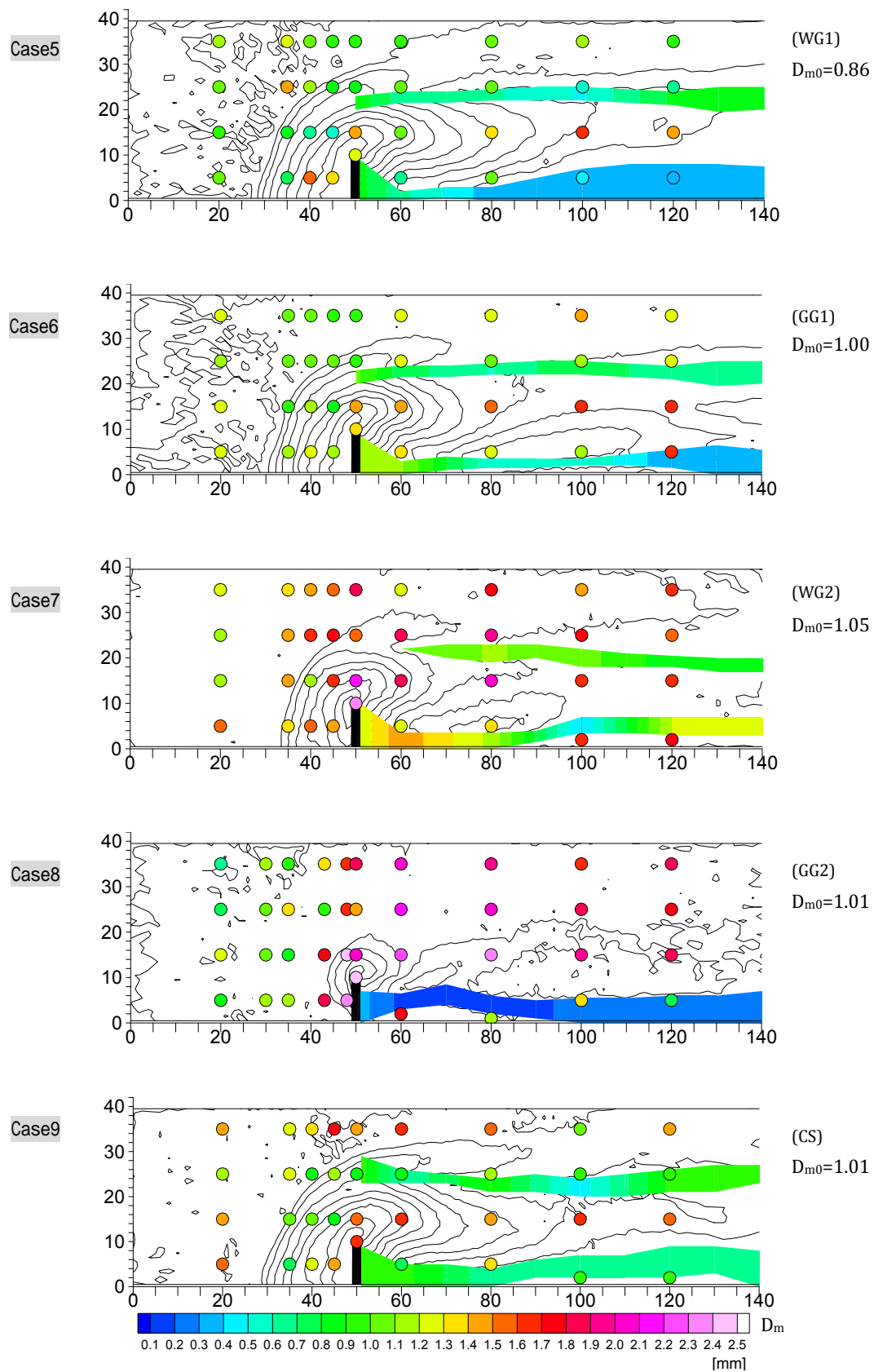


(b) 流線図

Fig. 3.44 PIV 法より解析された表面流速ベクトルと流線図

▼3.3.5 水制周辺の河床粒度変化特性

Fig. 3.45 は通水後の河床表層をサンプリングした粒度分布結果から平均粒径を求めたもので地点毎に色で値を示している。Fig. 3.46 にはその平均粒径を初期の平均粒径で除した値を示し、粒度分布の初期からの変化を色で示している。暖かい色は通水によって河床表層が粗粒化，冷たい色は細粒化したことを示す。また、水制下流の側壁側と洗掘孔縁の若干内側領域から下流に向けた縦断領域において、周辺に比べて細粒分が多く存在した結果となったため、その特徴的な帯状範囲の座標とその粒度分布の計測を加えて行っている。

Fig. 3.45 河床表層の平均粒径(D_m)

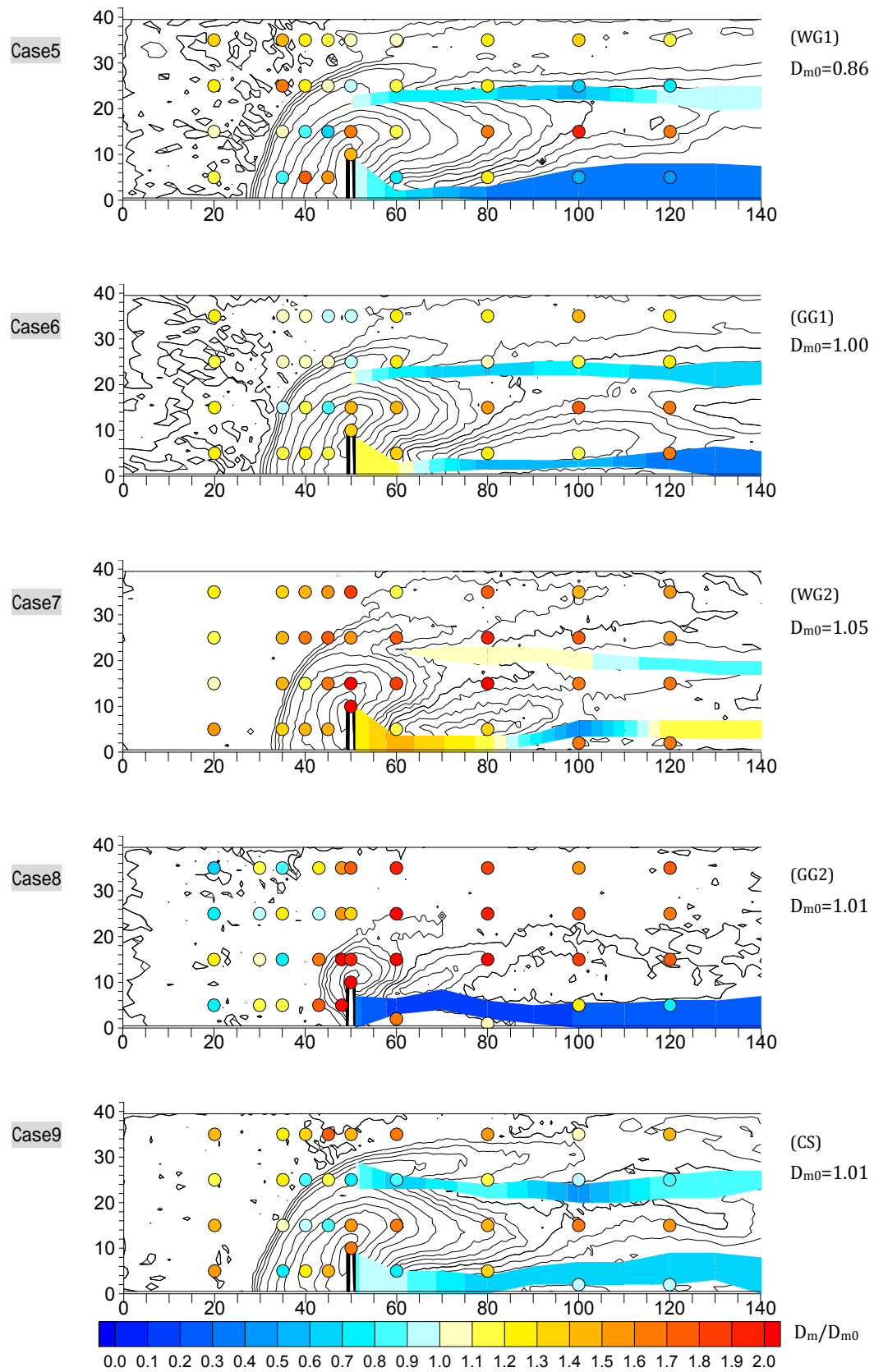


Fig. 3.46 河床表層の粒度変化(D_m/D_{m0})

全ケースにおいて、水制頭部近辺、そしてその水制頭部から下流に向かった縦断領域における粗粒化が目立つ。水制前面域の河床近傍流れは、先に示したように馬蹄形渦によって洗掘孔の縁へ向かう流れとなっており、洗掘孔の拡大過程において砂粒はその流れに乗って下流に運ばれるが、洗掘孔の河床勾配によって小さな砂粒はより外側、大きな砂粒は自身の重力によって内側を通過して迂回するような横断方向への分級作用が働くことが考えられる。そして、十分に発達した洗掘孔が形成されたケースにおいては、その縦断方向に伸びる粗粒化領域を挟むようにして、周囲より細粒化している2つの帯状領域が存在する。これらは上述した馬蹄形渦と後流渦、そして洗掘孔の河床勾配によって横断方向に分級作用が働いたためと考えられる。馬蹄形渦と後流渦は洗掘孔斜面の内側に存在し、砂粒は渦によって斜面を上る方向へと力が働くが、大きな砂粒は自身の重力のため小さな砂粒と移動経路が異なり、帯状領域に到達できなかったと考えられる。

Case8 では水路中央付近の細粒分帯状領域が存在しない。これは Case8 の河床材料条件が極端に粗い砂と極端に細かい砂を混合した河床条件であるため、水制下流側壁部に比べ流速の早い水路中央部において、0.17mm 程度の小さな砂粒では下流へ流されてしまったと考えられる。また洗掘孔が小さいケースであるため、帯状領域の上流側からの細粒分の供給が他ケースに比べて少ないこと、そして馬蹄形渦と斜面による横断方向の分級作用が弱くなったことも原因の一つと考えられる。

Fig. 3.47 はカラーサンドを用いた実験 Case9 の通水 3 時間後の河床表層撮影画像である。Fig. 3.46 に示す Case9 のサンプリング結果の細粒化領域と画像の赤い砂が目立つ領域、そして粗粒化領域と黒い砂粒が目立つ領域が一致し、撮影画像の見た目と粒度分布計測結果が対応していることが確認できる。水制頭部から縦断方向に伸びる粗粒化領域は Fig. 3.47 から幅が広く、一部粗粒化領域の境界に青い砂が目立つ領域が存在するが、多くは2つの細粒分帯状領域近くで粒度分布が極端に変化していることが確認できる。そして、無着色砂の実験と今回の粒度分布計測地点数のみでは把握が難しかったが、カラーサンドの実験より洗掘孔へり内側にも細かい砂が目立つ領域が存在することが確認できた。本実験で行った規則的に並んだ粒度分布測定地点では把握しきれない粒度の平面的な分布も、カラーサンド実験の画像により情報を補うことができた。

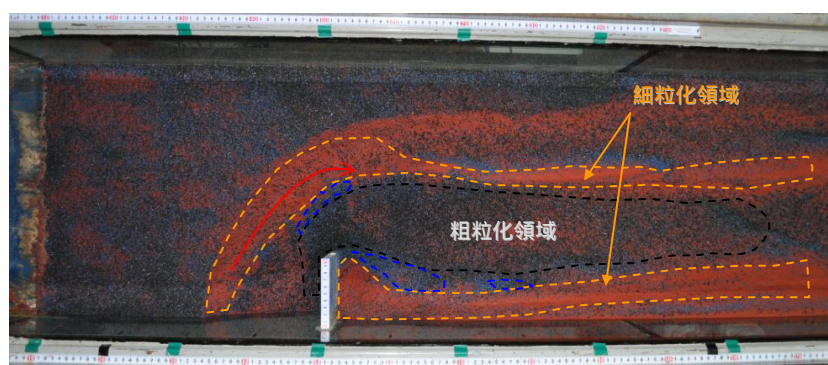


Fig. 3.47 通水 3 時間後の河床表層(Case9)

水制前面域の洗掘孔の縁に細かい砂が目立つのは、馬蹄形渦の流れの影響によって洗掘孔底部から洗掘孔縁まで細かい砂が運ばれることも原因の一つと考えられるが、洗掘孔が拡大する過程において

緑の河床勾配が大きくなり砂がずり落ちる現象においても、砂粒の分級作用が働くと考えられる。洗掘孔の河床勾配が大きくなり水中安息角程度にまで達すると、洗掘孔の縁の砂がずり落ちる現象が頻繁に発生し、本実験においても目視で確認された。その洗掘孔内のずり落ち現象において、より大きな砂粒は自身の重さによって小さな砂粒に比べて洗掘孔底部へと転動するが、小さな砂粒については馬蹄形渦によってずり落ちる距離が小さく洗掘孔縁近辺に残ることが考えられ、実験時においても大きな砂粒が転がるように、より洗掘孔底部へと移動する現象が頻繁に見られた。

カラーサンドの実験（Case9）においては、水路上部から 30 秒間隔でインターバル撮影を行っており、Fig. 3.50 にその撮影画像を示す。撮影画像から通水中においても河床表層の色の变化は捉えられ、河床表層粒度の経時変化を観察した。水制背後には洗掘初期過程（約 5 分後）において粒径の小さな赤い砂が目立って堆積し始め、その後、徐々に下流側へ伸び、赤い帯状領域が水制背後に形成される。水路中央近くの赤い砂の細粒化帯状領域についても、同じく実験開始から 5 分程度経過した早い時間帯で赤い砂が目立ち始めるが、主に帯状領域で他色の砂に混じりながら赤い砂が目立って下流に運搬されている状況にある。水路中央部は水制背後に比べ流速が早いために赤い砂粒は徐々に下流へ運搬されるが、Fig. 3.47 の矢印で示すように洗掘孔が大きくなる過程において、洗掘孔上流側の縁からずり落ちた赤い砂粒が洗掘孔の縁近傍を通り、その帯状領域に赤い砂粒が多く供給されている状況にあった。洗掘孔がある程度拡大した後は、左岸側の細粒分帯状領域における赤い砂粒の輸送は弱まり、動かない砂も目立つようになる。これは Fig. 3.43 に示す底面付近の流速コンターより、水路中央近辺の帯状領域においては、洗掘孔拡大に伴い馬蹄形渦によって流れが幾分上向きになり掃流力が低減したためと考えられる。Fig. 3.48 には通水 12 時間後の河床表層の撮影画像を示す。12 時間後においても 3 時間後と同様に粗粒化領域および細粒化領域が維持されており、特に左岸側細粒化領域についても十分に洗掘孔が拡大した平衡河床時において維持されることを確認した。

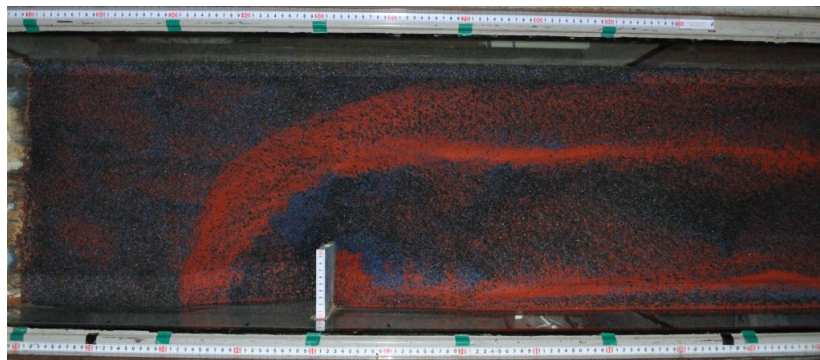


Fig. 3.48 通水 12 時間後の河床表層(Case9)

また、細粒化された帯状領域上において、小さい砂粒はほとんど動いていない状況下で、大きな砂粒は細粒化された帯状領域上を停止せずにそのまま下流へ輸送されていた現象が頻繁に見られた。これは池田⁵⁾で言われている“突出効果”と呼ばれる効果が働いたと考えられる。小さな砂粒の割合が高い河床面において、移動する大きな砂粒は必然的に河床上に突出し強い流体力を受け、停止せずにそのまま下流まで輸送されたと考えられる。このことから、一度河床表層に細粒分の多い領域が形成され

れば、突出効果によってその細粒化域を維持するような働きが作用することが考えられる。本実験においては、細粒化した帯状領域において、縦渦による流れの変化によって掃流力の低減と、大きな砂粒の突出効果の二つの要素が働き、細粒化領域が形成そして維持されたと考えられる。

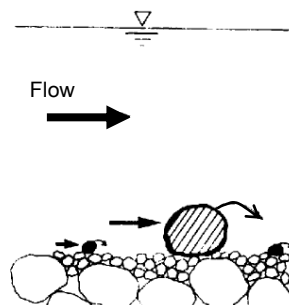


Fig. 3.49 突出効果の模式図⁵⁾

水制頭部とその下流域の粗粒化については、実験開始から 30 分程度までの洗掘と土砂移動が活発な時は、撮影画像からは粗粒化の程度が判別し難い状況である。しかし、洗掘孔がある程度発達した 30 分後程度からは黒い砂が目立ち、河床表層の粗粒化がはっきりと画像から確認できた。Case 9 の条件では、アーマ・コートのような粗粒化域が形成されるまでは、ある程度洗掘する必要があり時間を要した。粗粒化領域形成までにある程度時間を要する理由としては、平坦河床と洗掘河床の流れ場の違いから確認できるように、平坦河床の流れ場では馬蹄形渦と後流渦は存在せず水制下流の縦渦による横断方向への分級現象は発生しないことが一つの原因と考えられる。また、実験開始から洗掘孔が徐々に大きくなり、馬蹄形渦と後流渦が発生し、尚且つ河床勾配もある程度急勾配になってからでないと、水制上流側と下流側共に横断方向の分級効果が大きくならないことも原因と考えられる。

以上のように、粒径区分毎に色分けしたカラーサンド混合砂を用いて河床材料を構成し、上空から河床を撮影することによって、河床表層粒度の時間変化と平面的な変化傾向が視覚的に把握でき、3 次元的な流れ場の計測も併せて行うことによって、流れの 3 次元構造と河床表層の粒度分布変化の関係を明らかにすることができた。これまで記述したように、非越流型水制の洗掘河床における流れ場は、平坦河床に比べて流れの 3 次元が強く、平面方向に軸を持つ縦渦がいくつか存在し河床表層の粒度変化はその渦と密接な関係にあることがわかった。本節の最後として、Fig. 3.51 には本実験の流れの計測結果を表層流れと河床近傍流れに分けた模式図を示し、河床近傍の図については底面近傍流れに影響する渦構造と粗粒化・細粒化域の位置関係も模式図に含めて表した。

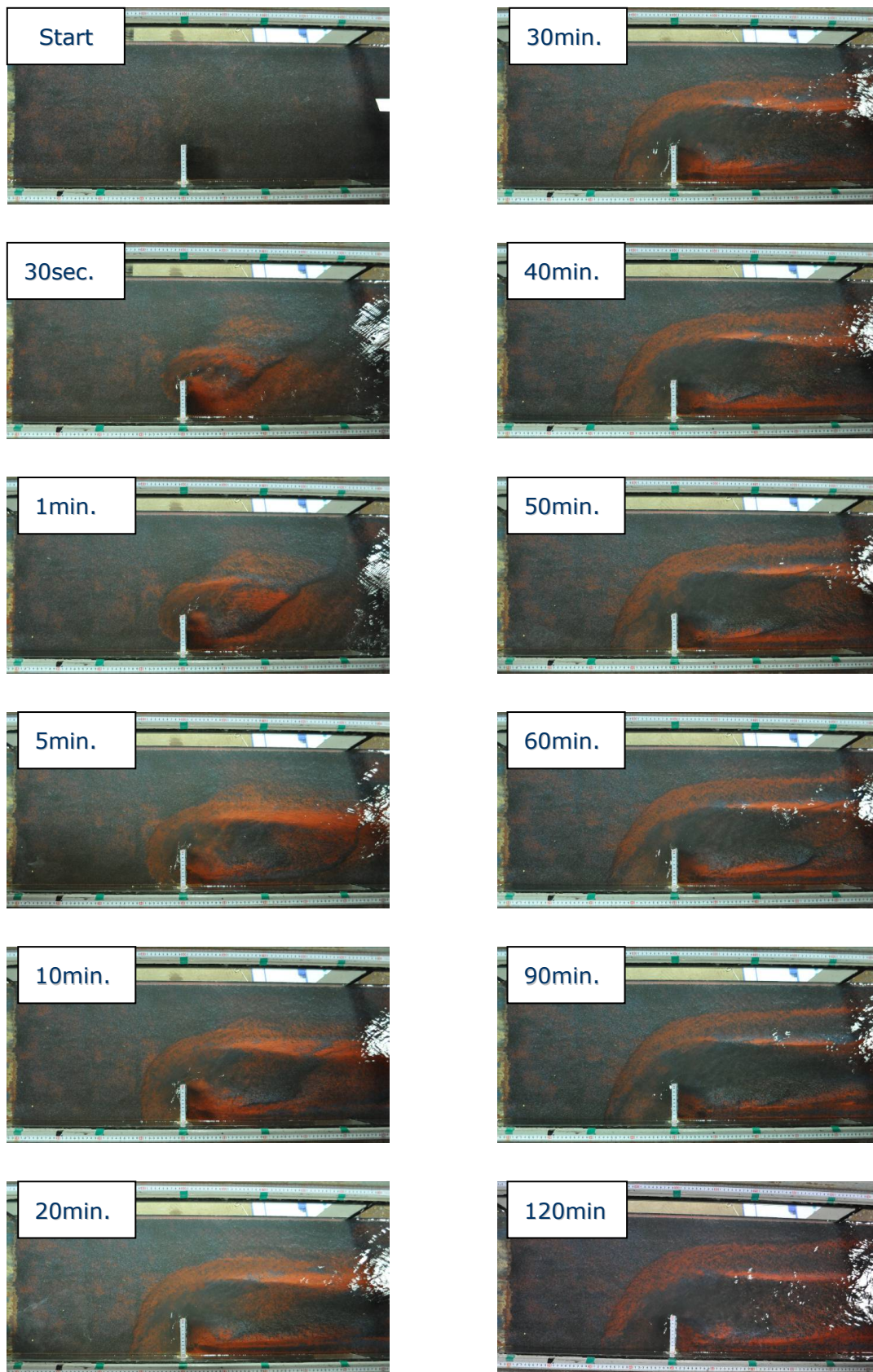


Fig. 3.50 水路上空からのインターバル撮影画像

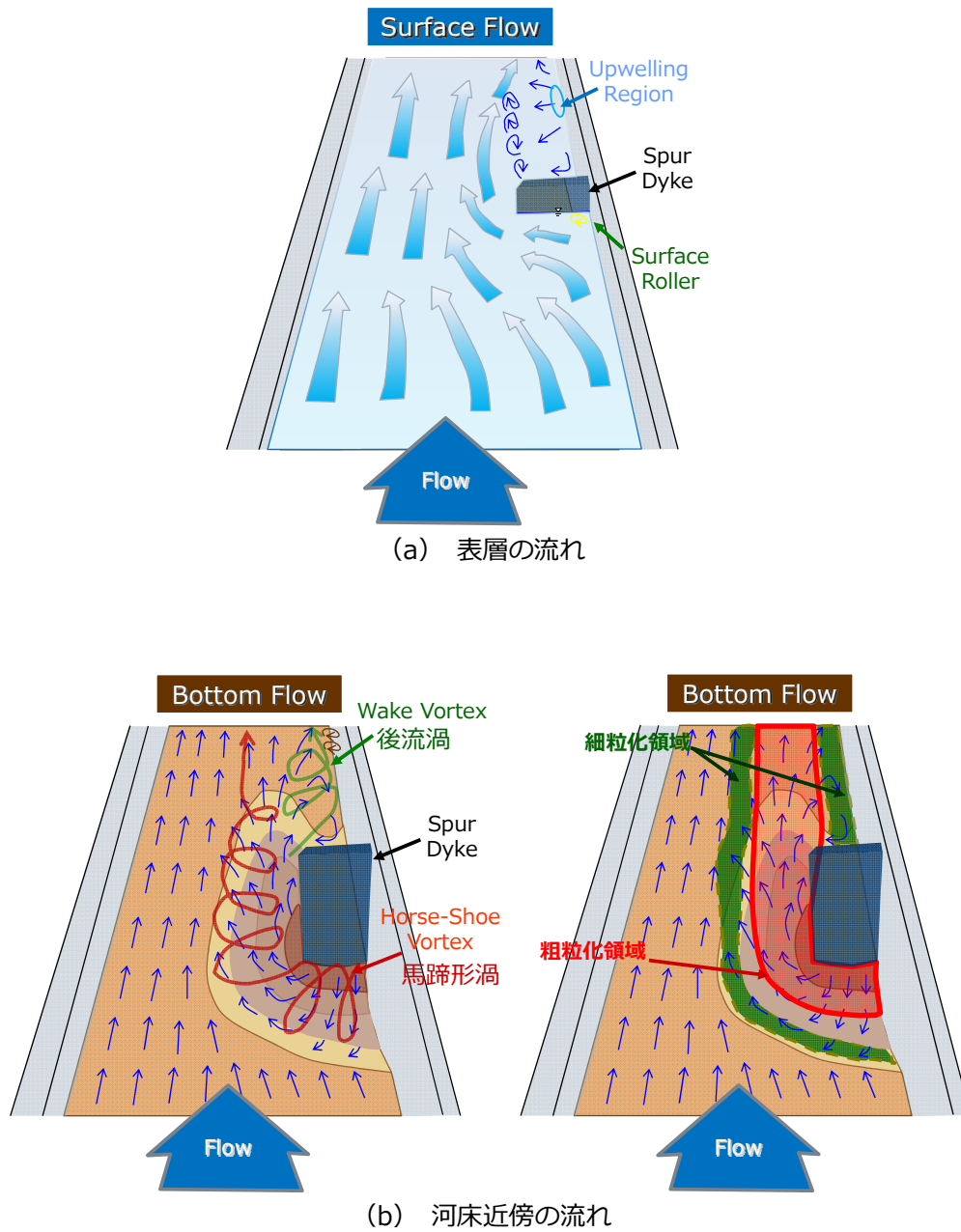


Fig. 3.51 非越流型水制周辺の洗掘河床上の流れ場模式図

3.4 まとめ

本研究では、長方形直線路を用いて非越流不透過型水制 1 基に対する移動床実験を行った。河床材料には、珪砂の 2 号から 7 号の均一砂およびそれらを混ぜ合わせた平均粒径が 4 号砂と同等で粒度分布の異なる 5 つの混合砂河床を作成し、粒度分布が水制のもたらす局所洗掘へ与える影響について比較検討した。そして、水制周辺の平坦河床および洗掘河床の 3 次元流れ場の計測と、3 つの粒径区分で色分けしたカラーサンドを用いた視覚的に表層の粒度変化を捉えた移動床実験により、水制周辺の粒度分布変化と流れの構造の関係について考察を行った。本実験で得られた結果をまとめると以下のようになる。

1. 粒度分布と河床変化

- (1) 水制周辺の局所洗掘において、平均粒径が同等の河床条件の場合、粒度分布の範囲が狭く幾何標準偏差 σ_g が小さい方が最大洗掘深および洗掘量が大きくなり、 σ_g が大きくなればなるほど最大洗掘深と洗掘量が小さくなる傾向があることが示され、水制周辺の洗掘深および洗掘量を予測する上で σ_g が重要なパラメータとなることを示した。
- (2) 平均粒径が同等という河床材料条件の縛りにおいて、 σ_g が大きければアーマ・コート形成に必要な粒径の大きな砂粒の存在割合が大きくなりアーマ・コート形成に必要な洗掘深が小さく、結果として最大洗掘深が小さくなる傾向を実験結果より示した。
- (3) 粒径の異なる均一砂を用いた実験より、水制周辺で pick-up された砂粒は、平均粒径が大きければ下流へは流されず水制設置位置の近くに堆積し、粒径が小さいほど下流へ流された水制から遠い位置に堆積する傾向を示した。混合砂に関しては、連続粒度である場合は堆積域が縦断方向に長く形成され、不連続粒度の堆積域については、構成している粒径の均一砂実験で得られた堆積傾向を複合したような堆積域が形成されることが確認された。

2. 非越流型水制周辺の 3 次元流れ構造

- (4) 平坦河床と洗掘河床上の非越流型水制周辺流れについて、3 次元的な流速場の計測を行い、水制周辺の河床が洗掘されることによって、流れの構造が平坦河床時と大きく異なることが計測結果より示された。
- (5) 平坦河床上の流れ場については、水制背後に鉛直方向に軸を持つ循環渦が発生し、水制頭部近傍では若干下向きの流れが見られるが、表層と低層までの流速ベクトルの向きが概ね一致し、流れの 3 次元性はそれほど強くないことが示された。本実験条件において、その平面渦の中心は、水制設置位置より水制長の 2 倍 (2L) 程度下流、右岸側壁からは 0.7L の位置に渦の中心が存在している。
- (6) 洗掘河床上の流れ場については、馬蹄形渦、後流渦、そして堆積域の峰を側壁から若干内側へ位置させる原因となる第 3 の縦渦が存在することが示された。

- (7) 洗掘孔が十分に発達した水制前面においては、同方向の渦が二つ存在し、上流側の渦の中心は右岸側壁に近いほど上流側に位置し、水制先端の横断方向に進むにつれてその二つの渦は近づき、水制先端の位置では重なって一つの渦を形成していることが測定結果より明らかとなった。また、水制前面洗掘孔内の下降流の縦断方向の幅については、渦の中心位置の関係から側壁近くで最も幅が広く、水制先端に近づくにつれて範囲が狭くなることが示され、その下降流の大きさについては、水制先端に近づくほど水制近くで大きくなっている傾向があることが示された。
- (8) 非越流型の水制頭部近辺の水面では、水制前面域から迂回してくる流れと上流からの流れにより流水の集中度が高く、水面下において顕著な下降流が計測された。
- (9) 洗掘河床上流れの水制背後域では、底層から水制背後へ回り込む流れが河床地形に沿って上がり湧昇域が形成されるような縦渦構造となっており、平坦河床上の水平渦の流れ構造とは大きく異なることが示された。
- (10) 水制設置位置より下流側においては、左岸側の洗掘孔縁から縦断方向の狭い範囲において、馬蹄形渦によって幾分上向きの流れとなり、河床近傍で相対的に平面方向の流速が弱まる領域が形成されていることが明らかとなった。そして、水制先端の下流域の底面流れ場においては舌状に流速が加速する特徴的な流速場が形成されることが示された。

3. 非越流型水制周辺の粒度変化

- (11) 混合砂を用いた非越流型水制の移動床実験より、混合砂河床では水制前面から水制頭部にかけた領域と、水制頭部から下流に向かった縦断領域において粗粒化が顕著な領域が形成されることが明らかとなった。
- (12) 洗掘孔が十分に発達したケースにおいては、水制頭部から下流に伸びる粗粒化領域を挟むようにして、側壁近傍と水路中央側の洗掘孔の縁において周囲より細粒化する2つの帯状領域が形成されることが示された。
- (13) 粗粒化領域は、水制前面から生じている馬蹄形渦と後流渦、そして洗掘孔の河床勾配によって横断方向に分級作用が働くことが明らかとなった。
- (14) 水制背後の細粒化領域は、水制先端域が洗掘することによって発生する後流渦によって細粒成分が水制背後へ輸送されて形成され、水制背後域は掃流力が弱いためにその細粒化域が維持される。そして、水路中央側の洗掘孔の縁に形成される細粒化領域は、洗掘孔がある程度拡大した後に形成され、洗掘孔の拡大過程では水制より上流側において、馬蹄形渦と洗掘孔の河床勾配の影響により洗掘孔縁の若干内側を細粒分が集中して輸送され水制を迂回し、細粒化領域に細粒分が供給される。そして、水制設置断面から下流側では、馬蹄形渦によって相対的に流速が低減された領域と細粒化領域が重なるように、洗掘孔縁の若干内側から縦断方向に伸びる細粒化領域が形成されることが実験結果より示された。

以上のように、非越流型水制周辺において、河床が洗掘されることによって流れ場の3次元構造が複雑となり、河床材料が非均一な場においてはその底面近傍の流れ場の影響により、多様性のある河床地形だけでなく多様性のある粒度分布環境が形成されることが確認された。

参考文献

- 1) 岩垣雄一 (1956)：限界掃流力に関する基礎的研究（Ⅰ）限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp. 1-21.
- 2) 土木学会編：「河川編」『水理公式集』（1999），平成11年版，丸善．
- 3) 藤田一郎 (1998)：PIV技術の実河川表面流速への応用，河川技術論文集，第4巻，pp. 41-46.
- 4) Chiew, Y. M. (1984)：Local scour at bridge piers, Report No355, Univ. of Auckland, School of Eng., New Zealand.
- 5) 池田宏 (1984)：二粒径混合砂礫の流送に関する水路実験，筑波大学水理実験センター報告，No.8, pp.1-15.

第4章

水制の越流状態が洗掘および粒度変化に与える影響

4.1 はじめに

3章では、水制工を設置した移動床実験の基本的な実験条件である非越流状態において混合砂を用いた実験を行い、非越流状態の水制がもたらす地形変化と粒度変化特性について、いくつかの混合砂河床実験と3次元的な流速場の計測を交えて考察を行った。本章では次のステップとして、越流状態の水制工が河床地形および周辺の粒度変化にもたらす影響について調べるために、いくつかの移動床実験を実施し考察を行った。

2章で記述したように、これまで越流型水制に関する研究の数は非越流型水制に関する研究と比べて少ないが、富永ら^{22) 23) 24) 25) 26)}によって平坦河床における流れ場は解明されつつあり、そして、Elawadyらの実験^{19) 20) 21)}によって直角および斜め型水制について、開度（Opening ratio）および水深・水制高比⁹⁾（Overtopping ratio）と洗掘深との関係について示され、その他にも多くの研究が存在する。しかし、まだまだ越流型水制に関する研究が十分なされたとはいえず、不明な点も多く残っている。例えば、越流型水制がつくり出した洗掘河床における3次元流れ場に関する情報がまだまだ不十分である。そして完全越流状態から非越流状態までの水制高の違いが、最大洗掘深だけでなく周辺地形の洗掘および堆積にどのような平面的な違いをもたらすのかについては、情報が不足している。また、非越流型水制と同様に混合砂河床における越流型水制の実験が皆無であり、河床材料の粒度分布が越流型水制周辺の河床地形にどのような影響を及ぼすのか、そして河床表層の粒度分布変化に関して水制高の違いがどのような違いをもたらすのか不明な点が多い。本研究では、これらの点について着目して成果をまとめている。

4.2 実験条件と実験方法

実験に用いた水路は、3章に記述した水路と同じものを用いた。また、越流と非越流時の結果を比較できるように、水理条件を3章のものと一致させている（Table 4.1）。

水制工はFig. 3.2に示すように、長さ10cm、幅1cmの水制工を水路右岸側に側壁に直角に設置し、実験ケース内では水制の長さを固定し、高さをいくつか変更させて実験を実施した。実験ケースをTable 4.2に示す。実験は大きく分けると、非越流実験でも基準にしていた珪砂4号を用いた均一砂実

験，そして Fig. 4.2 に示す3つの混合砂を用いた実験である．均一砂実験では，水理条件を固定し同じ均一砂河床を用いて，水制の高さのみを変更した合計6ケースを実施し，水制の高さが河床地形の変化に与える影響を考察している．そして，混合砂実験では，3章と同様に珪砂4号の均一砂を基準とし，平均粒径が同等の粒度分布の異なる3つの混合砂河床を用いて水制高を変更し，水制工の越流状態の違う条件において，初期粒度分布が河床地形および水制周辺の粒度変化にもたらす影響について検討を行っている．3つの混合砂の詳細については，Table 4.3 に示すが，3章の Mix3～Mix5 と同じである．

Table 4.1 実験条件

流量 Q (ℓ/s)	5.7
水路勾配 I	1/1000
水路幅 B (cm)	40.0
水深 h_0 (cm)	5.0
接近流速 U_0 (cm/s)	28.5
摩擦速度 u_* (cm/s)	1.98
砂の密度 (g/cm ³)	2.65
水制長さ L (cm)	10.0
水制幅 (cm)	1.0
Reynolds 数 $Re = U_0 h_0 / \nu$	14,250
Froude 数 $Fr = U_0 / \sqrt{gh_0}$	0.41

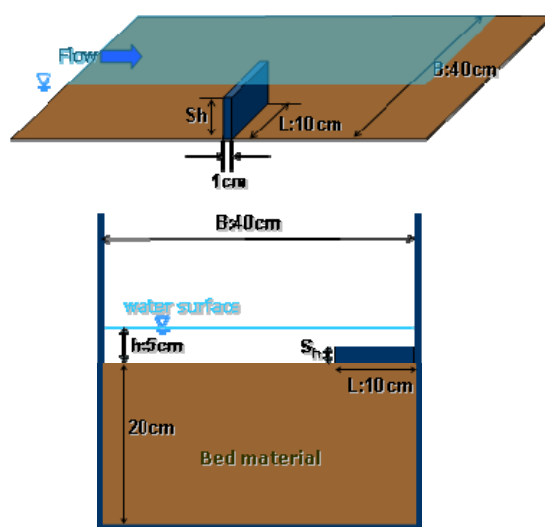


Fig. 4.1 水制工設置模式図

Table 4.2 実験ケースと水制および河床条件

Case No.	Case Name	河床材料	D_{m0} (mm)	σ_g	S_h	S_h/h_0	α
1	U-NS	均一砂(No.4)	1.03	1.14	Emerged	-	0.75
2	U-Sh4	均一砂(No.4)	1.03	1.14	4.0	0.8	0.80
3	U-Sh3.0	均一砂(No.4)	1.03	1.14	3.0	0.6	0.85
4	U-Sh2.5	均一砂(No.4)	1.03	1.14	2.5	0.5	0.88
5	U-Sh1.5	均一砂(No.4)	1.03	1.14	1.5	0.3	0.93
6	U-Sh0.75	均一砂(No.4)	1.03	1.14	0.75	0.15	0.96
7	M-NSCS	混合砂(Mix5)	1.01	2.55	Emerged	-	0.75
8	M-NSWG2	混合砂(Mix3)	1.01	3.62	Emerged	-	0.75
9	M-NSGG2	混合砂(Mix4)	1.05	4.30	Emerged	-	0.75
10	M-Sh4CS	混合砂(Mix5)	1.01	2.55	4.0	0.8	0.80
11	M-Sh4WG2	混合砂(Mix3)	1.01	3.62	4.0	0.8	0.80
12	M-Sh4GG2	混合砂(Mix4)	1.05	4.30	4.0	0.8	0.80
13	M-Sh2.5CS	混合砂(Mix5)	1.01	2.55	2.5	0.5	0.88
14	M-Sh2.5WG2	混合砂(Mix3)	1.01	3.62	2.5	0.5	0.88
15	M-Sh2.5GG2	混合砂(Mix4)	1.05	4.30	2.5	0.5	0.88

※幾何標準偏差 $\sigma_g = \sqrt{d_{84}/d_{16}}$

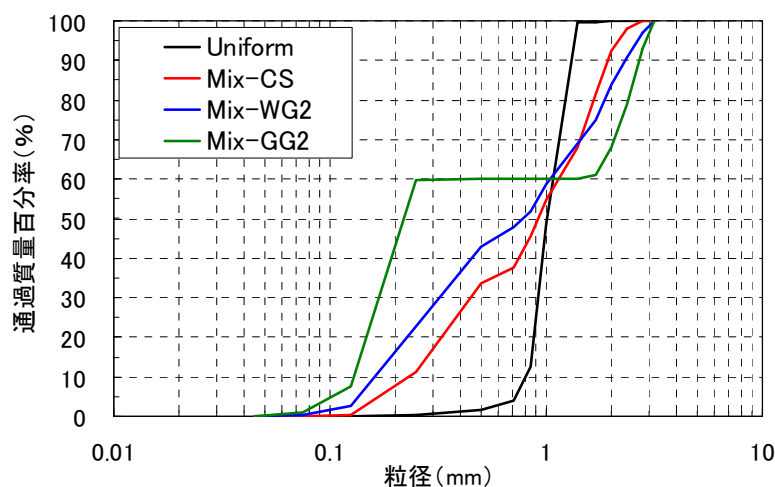


Fig. 4.2 河床の粒度分布

Table 4.3 各混合砂ケースの詳細

Bed name	平均粒径,幾何標準偏差	詳細
Mix3-WG2	D_{m0} :1.01mm σ_g :3.62	2号～7号までを均等割合で混合(Well Graded)
Mix4-GG2	D_{m0} :1.05mm σ_g :4.30	2号と7号を2:3の割合で混合した不連続粒度混合砂(Gap Graded)
Mix5-CS	D_{m0} :1.01mm σ_g :2.55	赤・青・黒の3色のカラーサンド(Well Graded)

4.3 実験結果とその考察

▼4.3.1 局所洗掘と水制高の関係

Fig. 4.3 に各均一砂実験の通水3時間後のほぼ平衡状態に達した河床形状を示す。この実験は、相対水制高 (S_h/h : 水制高 S_h と水深 h_0 の比) が $0.15 \sim 0.8$ と非越流状態 ($S_h/h_0 > 1$) の結果を示しており、水制高が高くなれば洗掘深と洗掘範囲が大きくなっていることがまず確認できる。そして、ケース間の洗掘孔の違いを明らかにするために、非越流型水制実験時と同様に Fig. 4.4 に示す洗掘孔のパラメータ (最大洗掘深や洗掘孔の大きさ、河床勾配等) を Table 4.4 に整理した。

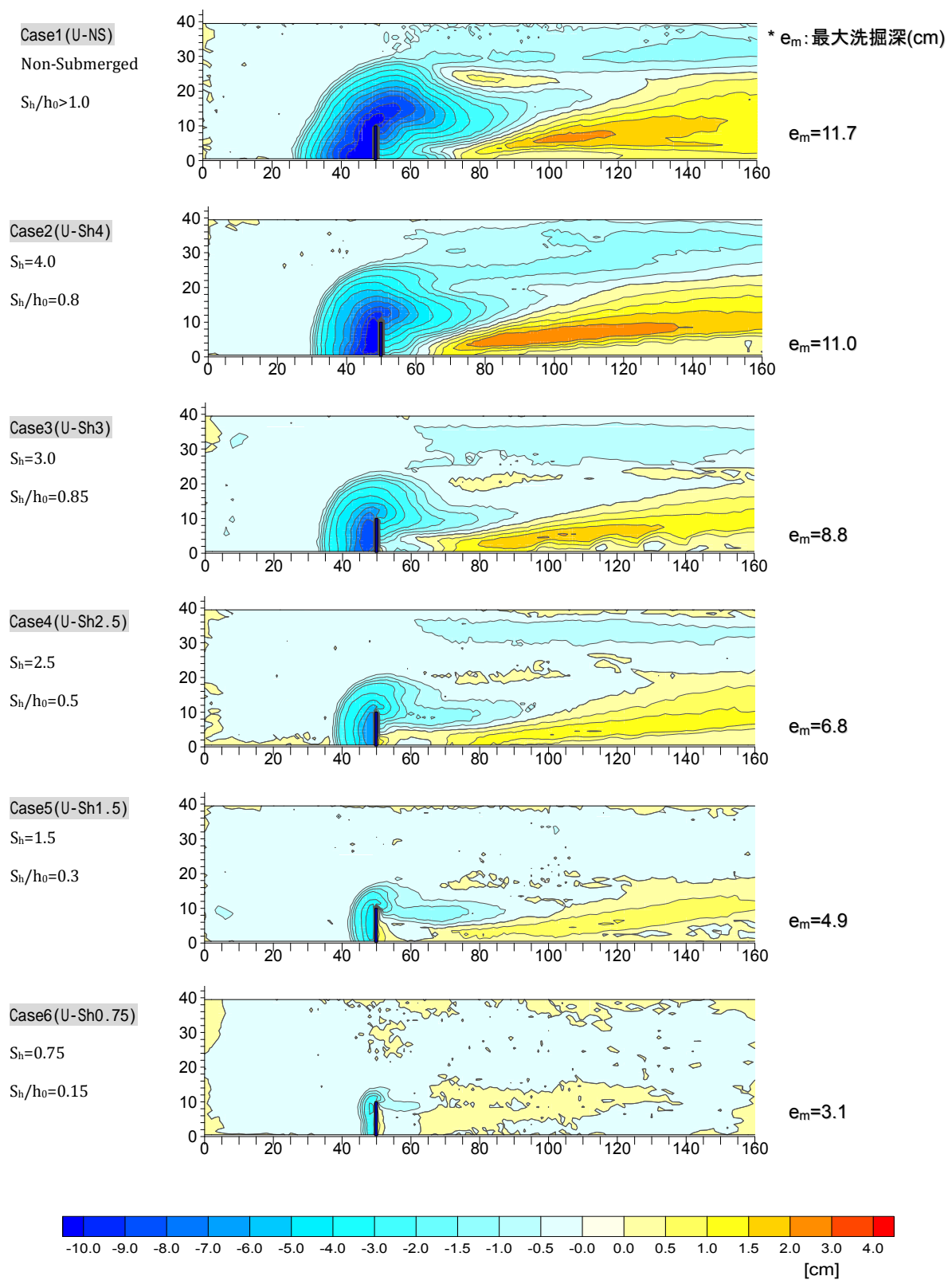
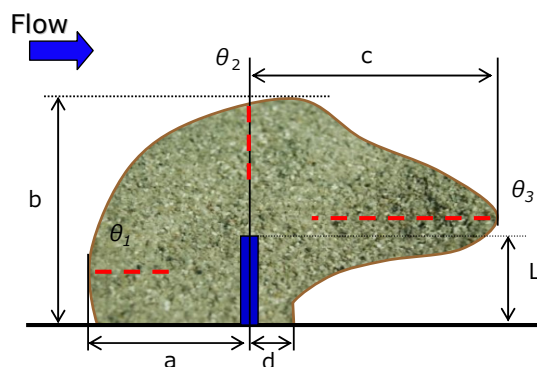


Fig. 4.3 通水3時間後の河床形状（均一砂ケース）



e_m : 最大洗掘深 ($e_m^* = e_m / \sqrt{hL}$)
 h : 水深 L : 水制長さ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$: 各方向の河床勾配
 V_s : 水制周辺の洗掘量

Fig. 4.4 洗掘孔の略図

Table 4.4 均一砂ケースの洗掘孔の寸法

Case No.	1	2	3	4	5	6
Case Name	U-NS	U-Sh4	U-Sh3.0	U-Sh2.5	U-Sh1.5	U-Sh0.75
a/L	2.1	2.0	1.7	1.2	0.8	0.5
b/L	2.9	2.7	2.4	2.1	1.7	1.4
c/L	4.0	4.5	4.0	4.2	3.7	1.2
d/L	1.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
$\theta_1(^{\circ})$	31	30	29	30	31	32
$\theta_2(^{\circ})$	31	29	29	29	28	32
$\theta_3(^{\circ})$	12	12	18	15	14	1
$e_m(\text{cm})$	11.7	11.0	8.8	6.8	4.9	3.1
e_m^*	1.66	1.56	1.24	0.96	0.69	0.44
$V_s(\text{cm}^3)$	5978	4410	2061	1102	460	148
$D_{m0}(\text{mm})$	1.03					
σ_g	1.14					

洗掘孔内における最大洗掘深発生位置は、非越流およびどの越流ケースにおいても、水制前面の中央付近に位置している。Fig. 4.5 には水深と水制長さで無次元化した最大洗掘深と相対水制高（水制高/水深）の関係を示し、Fig. 4.6 には水制周辺の洗掘量と相対水制高の関係を示す。図より最大洗掘深および洗掘量の値は、相対水制高が大きくなるにつれて洗掘深も大きくなっている。これらは、既に Elawady ら¹⁹⁾の研究で Opening ratio、もしくは Overtopping ratio と洗掘深の関係を示されており、開度が小さくなれば洗掘が大きくなる傾向を実験結果より得ている。本研究では、まだ知見が乏しいと考えられる洗掘および堆積の平面的な変化傾向に着目するために、より細かく水制高を変更した実

験を行い、水制高の違いがもたらす洗掘拡大および堆積進行が平面的にどのような傾向を示すのかを明らかにしている。本研究では、越流状態だけでなく非越流状態を加えた相対水制高 0.15 から 1.0 の範囲で実験を行っている。水路幅、水制長さ、水深が全ケース固定し、水制高のみをパラメータとして変化させているため、実験結果については相対水制高との関係として整理している。最大洗掘深と相対水制高の関係については、本実験条件では線形関係に近い結果が得られている。

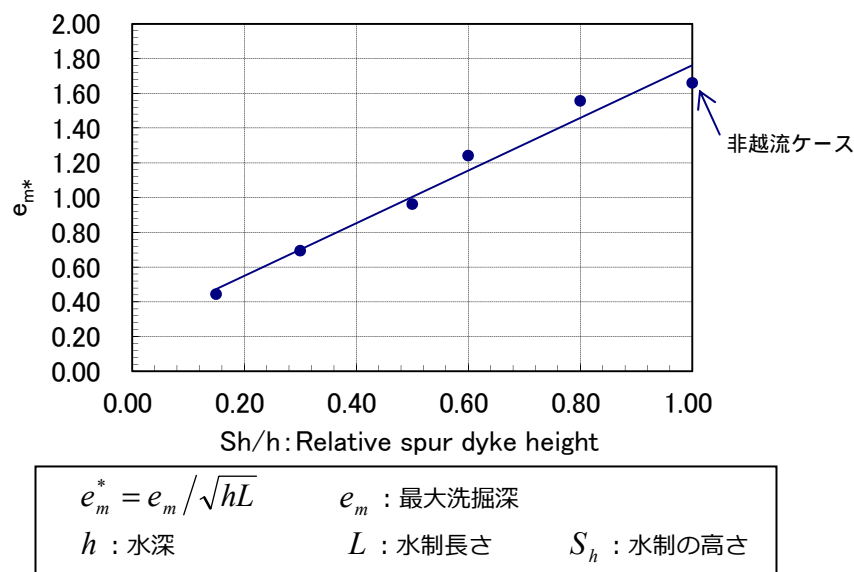


Fig. 4.5 最大洗掘深と相対水制高の関係

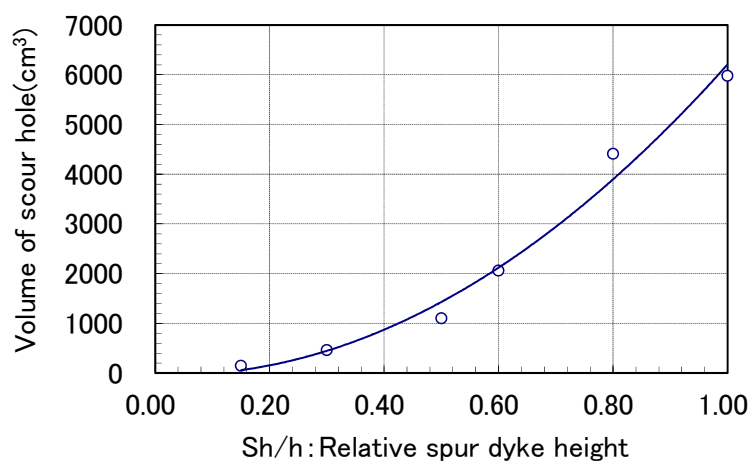


Fig. 4.6 洗掘量と相対水制高の関係

Fig. 4.7 は水制先端から 1 cm の場所におけるほぼ平衡河床の縦断面図である。縦断面図からも水制高が高くなるにつれてほぼ相似形状で洗掘孔が大きくなっていることが確認できるが、非越流とほぼ非越流ケースの河床形状の様子が若干他のケースと異なる。相対水制高が 0.8 までは、最大洗掘深位置が

水制設置位置近くに発生し、相対水制高が大きくなるにつれて、水制の上流側および下流側で同じ程度洗掘が進んでいる様子が確認できるが、非越流ケース(U-NS)と水制高 4cm(U-Sh4)のケース間を比較してみると、水制設置上流側の河床形状がほぼ同じで、下流側の洗掘の進行のみの大きいことが確認でき、Fig. 4.3 の河床コンター図からも非越流ケースのみ水制頭部とその若干下流域の洗掘が大きいことが確認できる。また、Fig. 4.8 には水制の高さのみが異なるケース番号の隣り合ったケース間の河床高の差をコンターに図示した。この図より、水制が段階的に高くなることによって平面的にどの位置の洗掘が進行し、どの位置に堆積する量が増加するのかが確認することができる。(b)～(e)の越流状態において、水制高が高くなるにつれて水制上流側への洗掘孔拡大し、水制背後域への堆積が進むことが確認できるが、(a)の非越流に近い越流状態と非越流状態の間のみ若干傾向が異なっており、水制が非越流状態になることによって、水制上流側の側壁近くについては洗掘が進むが、それより水制頭部とその下流側の洗掘が特に大きくなっていることが確認できる。これは表層付近の流れを水制で完全に遮断することによって、越流時と比べて水制頭部に集中する流水が急増し、その影響により水制頭部域で顕著な下降流が発生し、そのため水制設置下流側で洗掘が大きくなったと考えられる。また、水制下流側の $y=25$ の位置で縦断方向に細長く伸びる堆積領域見られるが、これは非越流状態においては馬蹄形渦が顕著に存在するため、3章の Fig. 3.43 に示したように馬蹄形渦により上向きの流れが続く領域で掃流力が相対的に周囲より小さくなったためだと考えられる。

洗掘量の傾向変化についても確認するために、Fig. 4.9 には水制設置位置 ($x=50$) を境に洗掘量を上流側 ($V_{S_{up}}$) と下流側 ($V_{S_{down}}$) に分けて、相対水制高とその洗掘量の関係を図示したものである。この図より、越流状態の全ケースについては、水制より上流側の洗掘量が多いが、非越流状態ではその傾向が逆転し下流側の洗掘量が急に増加していることが確認でき、非越流型水制では越流型と比べて下流側の洗掘が進行する特徴が表れている。

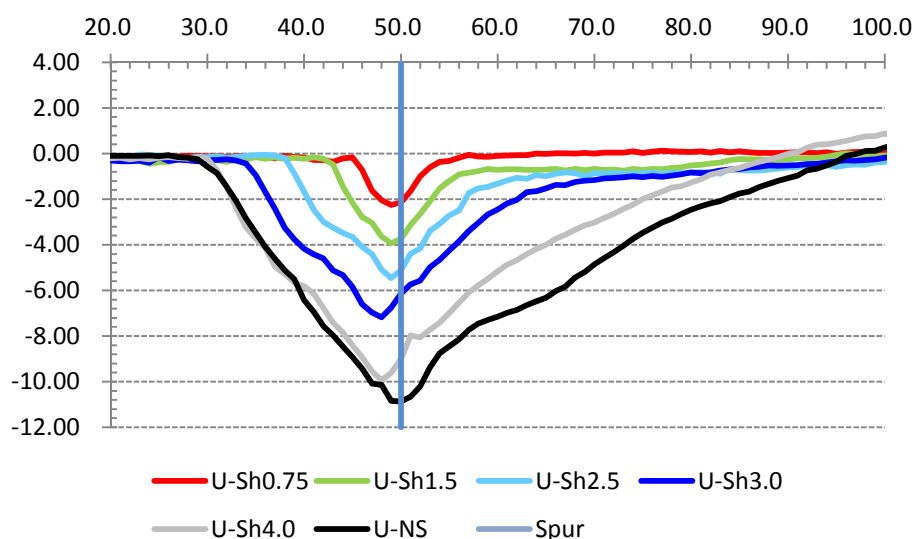


Fig. 4.7 水制先端近辺の河床縦断図

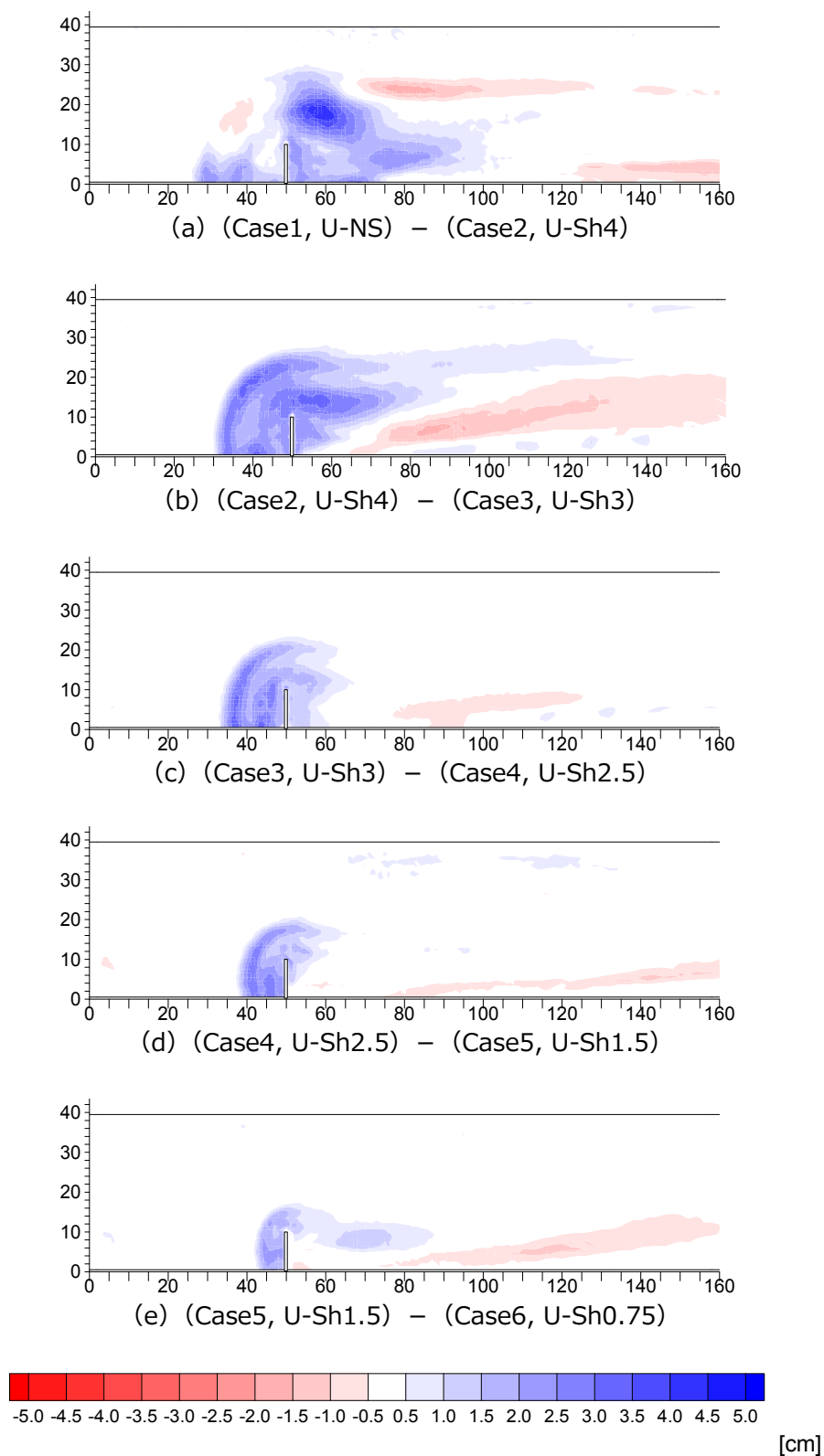


Fig. 4.8 河床高のケース間の差（均一砂ケース）

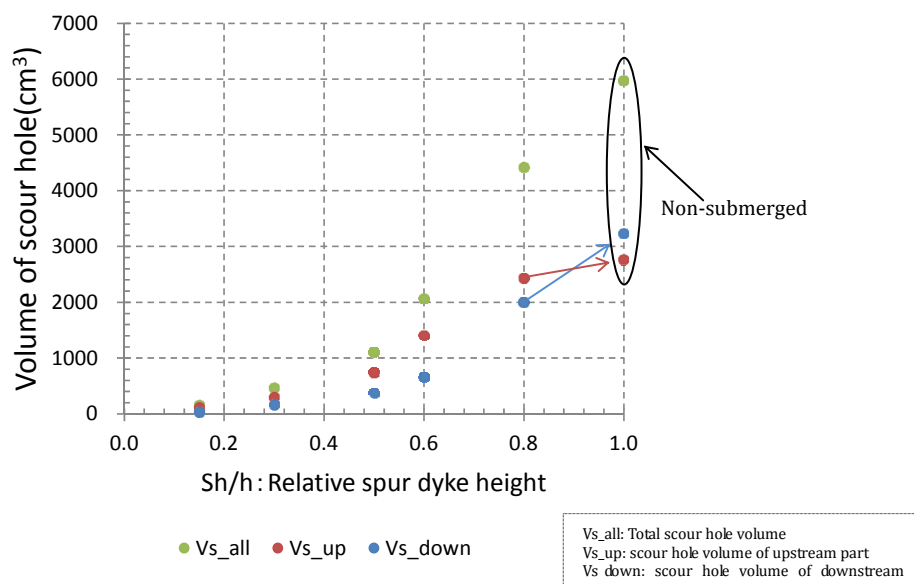


Fig. 4.9 水制上流側および下流側の洗掘量と相対水制高の関係

Fig. 4.10 に水制前面の縦断形状と水制設置位置 $x=50\text{cm}$ の横断方向の洗掘孔形状を示す。Fig. 4.10 および Table 4.4 に示すとおり、水制前面と横断方向の洗掘孔の勾配 (θ_1 , θ_2) は、どの水制高ケースにおいても $29^\circ \sim 32^\circ$ 程度と概ね一緒で、水中安息角程度の値を示しており、実験時には徐々に水制近傍の洗掘が進み、河床勾配が水中安息角を越え、洗掘孔の縁の砂がずり落ちるような現象を目視で確認している。

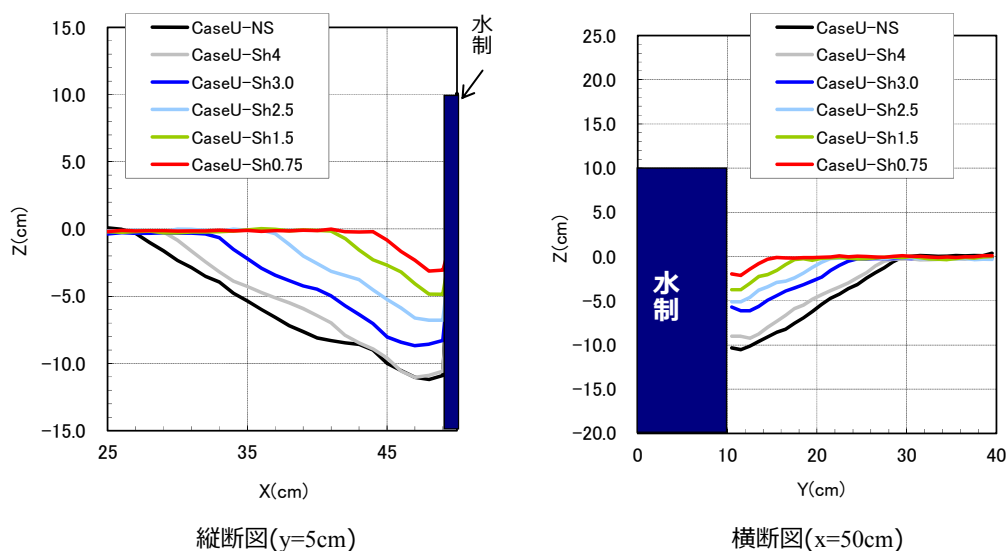


Fig. 4.10 水制前面と横断方向の洗掘孔形状

Fig. 4.11(a)には洗掘孔の平面的な大きさと最大洗掘深の関係を示しており、洗掘過程の後期において水制上流側は主に水中安息角による砂のずり落ち現象により洗掘孔拡大が進行するため、水制前面と横断方向の洗掘幅 (a/L , b/L) についてはほぼ最大洗掘深と正の相関があり、線形関係に近い結果となっていることがわかる。そのため、水制前面と横断方向の洗掘幅については、洗掘深予測式等で最大洗掘深を求め、その値から洗掘範囲を推定することによってある程度妥当な結果が得られると言えそうである。また、先述したように相対水制高と最大洗掘深とはほぼ線形関係にあるため、水制上流方向と横断方向の洗掘幅は Fig. 4.11(b)に示すように相対水制高とも正の相関で線形関係を示すことになる。水制背後の洗掘幅 (d/L) については、洗掘が少ないケースにおいてはゼロの値を示し、非越流および水制高 4.0cm の非越流に近い $S_h=4$ のケースのみ水制背後に洗掘が生じている。Fig. 4.12 に示すように水制先端から水制背後にかけて河床勾配が水中安息角程度となっており、水制背後においても水制先端に向かって砂がずり落ちる現象によって洗掘が進むことがわかる。 a/L , b/L の水制上流と横断方向の洗掘幅については、最大洗掘深発生地点である水制前面の洗掘深の大きさによって砂がずり落ち洗掘幅が拡大するため、洗掘孔内の最大洗掘深によって支配されると考えられる。しかし、 d/L については、洗掘幅が拡大する基本現象は同じと考えられるが、その洗掘幅の大きさを支配するのは、水制頭部から下流域に伸びる洗掘領域の深さとその縦断方向の幅だと考えられる a/L , b/L とは異なる傾向を示している。

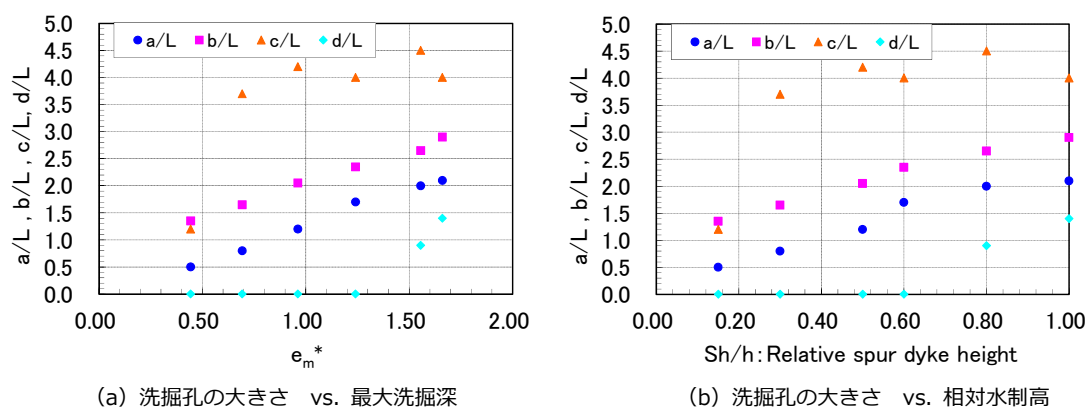


Fig. 4.11 洗掘孔の大きさと最大洗掘深・相対水制高の関係

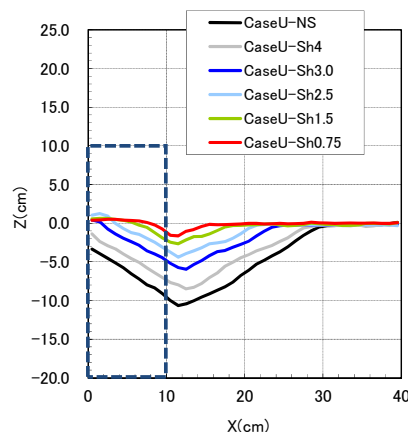


Fig. 4.12 水制背後の河床地形の横断形状

▼4.3.2 水制高と水制背後域への土砂堆積

水制の高さが水制背後への土砂堆積へ与える影響を調べるために、Fig. 4.13 に示す水制長の 10 倍の水制背後の縦断領域において、各ケースの堆積土砂量を整理し比較を行った。Fig. 4.14 には均一砂ケースについて、水制背後域の堆積量 (V_{dsd}) と相対水制高 (S_h/h_0) の関係を示す。相対水制高が大きくなれば水制背後への土砂堆積量は多くなる傾向が見て取れるが、非越流時はほぼ非越流状態である $S_h/h_0=0.8$ ケースより若干堆積量が少ない結果となった。非越流時では水制背後域の土砂堆積量最大とならず、非越流に近い越流状態で水制背後域の土砂堆積量が最大となることが実験結果より示された。越流状態のケース内では、水制高が大きくなればその分洗掘量が増加するため、水制背後へ輸送される土砂量が増し、水制背後域の土砂堆積量が高くなることについては疑問の余地はない。ほぼ非越流から非越流状態でその傾向が逆転する原因は、上述した水制頭部とその若干下流域において非越流ケースの洗掘が大きい傾向を示すことと大きく関わっていると考えられる。水制頭部下流域において洗掘が進むためには、その領域の掃流力が大きくあること、さらに水制背後への堆積傾向が異なってくるためには、非越流とほぼ非越流状態において、水制頭部で pick-up された砂の運ばれる方向が異なる必要がある。流速計測結果の詳細については後述するが、非越流状態では越流状態に比べ馬蹄形渦の存在が顕著で渦を構成する流速が大きく、水制頭部または水制上流側で pick-up された砂は、その渦による底面流れの違いにより左岸側へ運ばれるため、非越流時についてはほぼ非越流状態である $S_h/h_0=0.8$ ケースより水制背後域において若干堆積量が少ない結果となったと考えられる。

また、Fig. 4.15 に示すように洗掘量に対する水制背後域の土砂堆積量の割合として見た場合、水制背後域への土砂堆積割合は先程とは逆の傾向を示す。 $S_h/h_0=0.15$ ケースを除くと、相対水制高が低いと洗掘した土砂は水制背後域へ堆積する傾向が高いこと、洗掘が進めば pick-up された砂粒が水制背後域へ行かずそのまま下流へ流される割合が増加することを意味している。後述するが、相対水制高が大きくなれば、河床近傍流れにおいて、水制先端から左岸へ向かう流れが大きくなっていることがひとつの原因と考えられる。水制先端において左岸側へ向かう流れが大きい場合は、上流から水制を迂回して輸送されてきた土砂が水制背後へは向かいにくいいためそのまま下流へ輸送され、その傾向がこの結果に表れたと考えられる。

ただし、最も水制が低い $S_h/h_0=0.15$ ケースについては、水制背後の土砂堆積割合が小さい結果となった。これは、水制高が水深に比べて極端に小さいために水制背後で流速がそれほど小さくならず、pick-up された砂粒はそのまま下流へ流されてしまった可能性も考えられるが、Fig. 4.3 の $S_h/h_0=0.15$ ケース河床高コンターより水制頭部下流域に堆積土砂が広がっている傾向を見ると、水制先端の洗掘が小さいこと、また、水制が極端に低いために、水制背後へ向かう後流渦が顕著に存在せず、河床近傍で水制背後に向かう流れが弱いことが主な原因と考えられる。この結果より、極端に水制が低い場合は流れ場の様子が若干異なることが推察される。

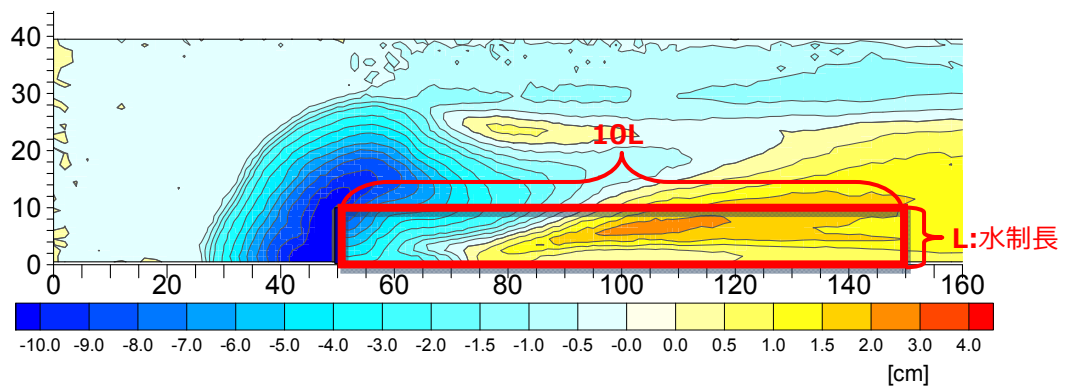


Fig. 4.13 本研究における水制背後域の定義

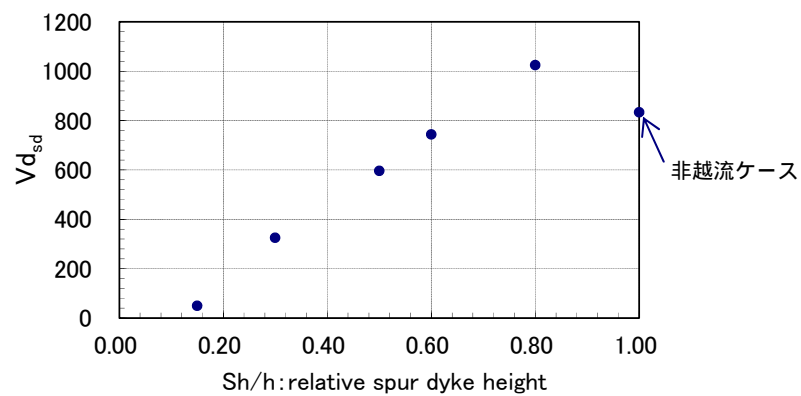


Fig. 4.14 水制背後への土砂堆積量と相対水制高の関係

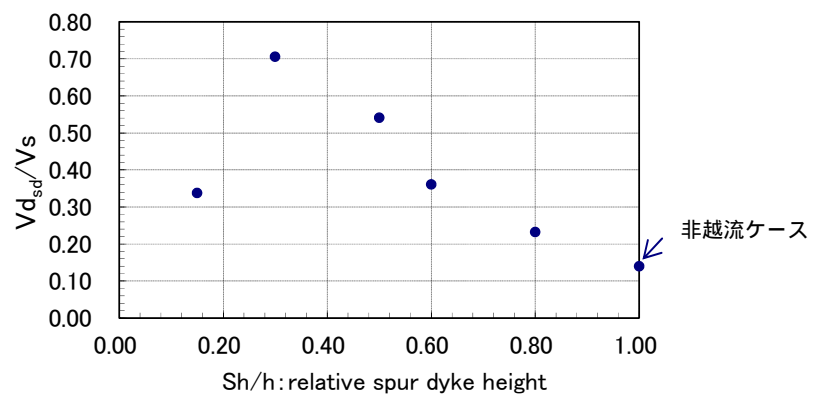


Fig. 4.15 水制背後への土砂堆積と相対水制高の関係

▼4.3.3 河床粒度分布が越流型水制周辺の河床変化に与える影響

Fig. 4.16 には非越流, Fig. 4.17 には水制高 $S_h=4.0\text{cm}$ の $S_h/h_0=0.8$ 越流ケース, Fig. 4.18 には $S_h=2.5\text{cm}$ の $S_h/h_0=0.5$ 越流ケースの均一砂と混合砂の各河床材料ケースについて, 通水 3 時間後の河床高コンター図を幾何標準偏差 σ_g の小さい順に上から表示している. また Table 4.5 には均一砂実験と同様に, 混合砂ケースについて最大洗掘深, 洗掘孔の大きさや河床勾配等を表にして整理している.

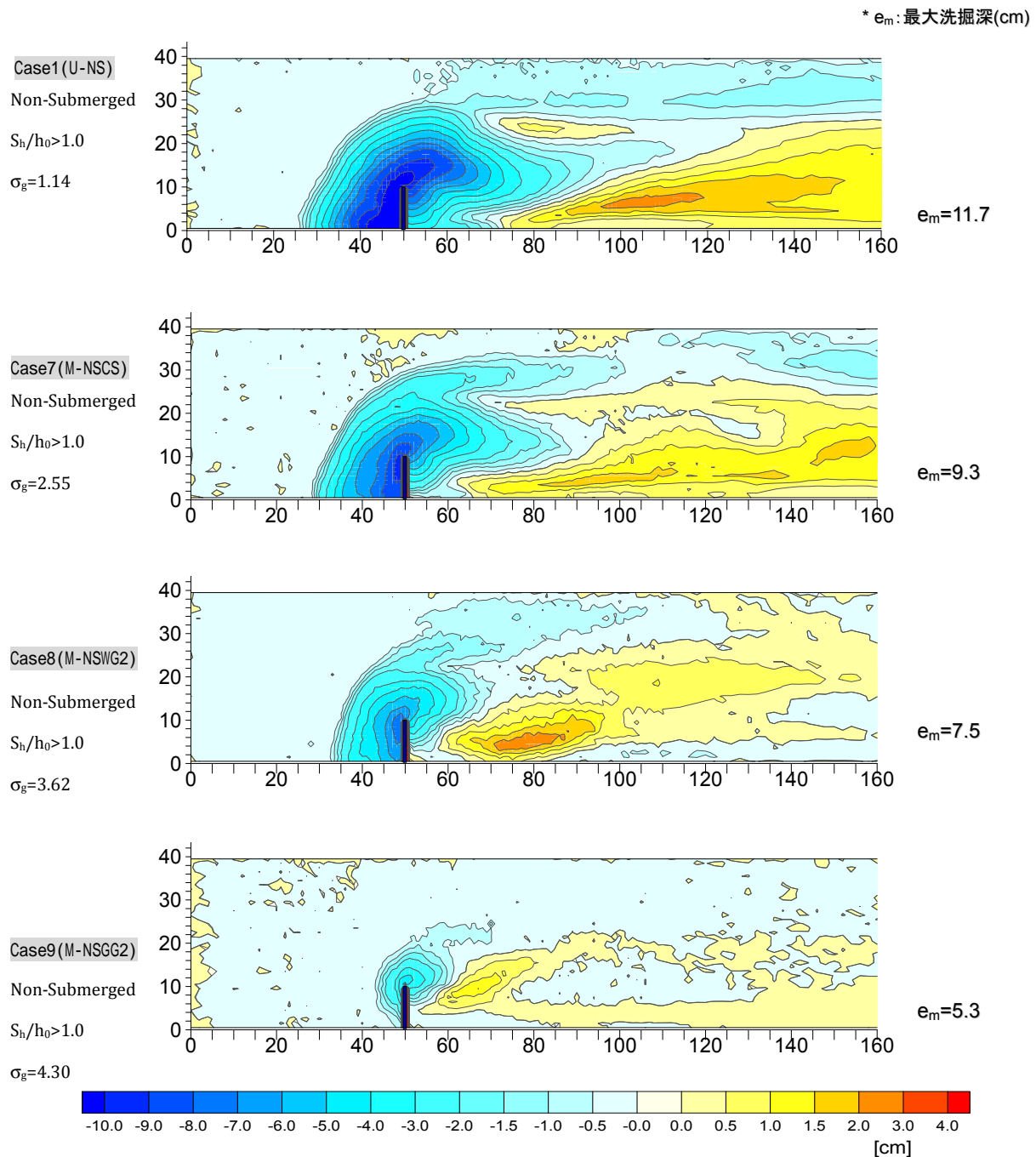


Fig. 4.16 通水 3 時間後の河床形状（非越流ケース）

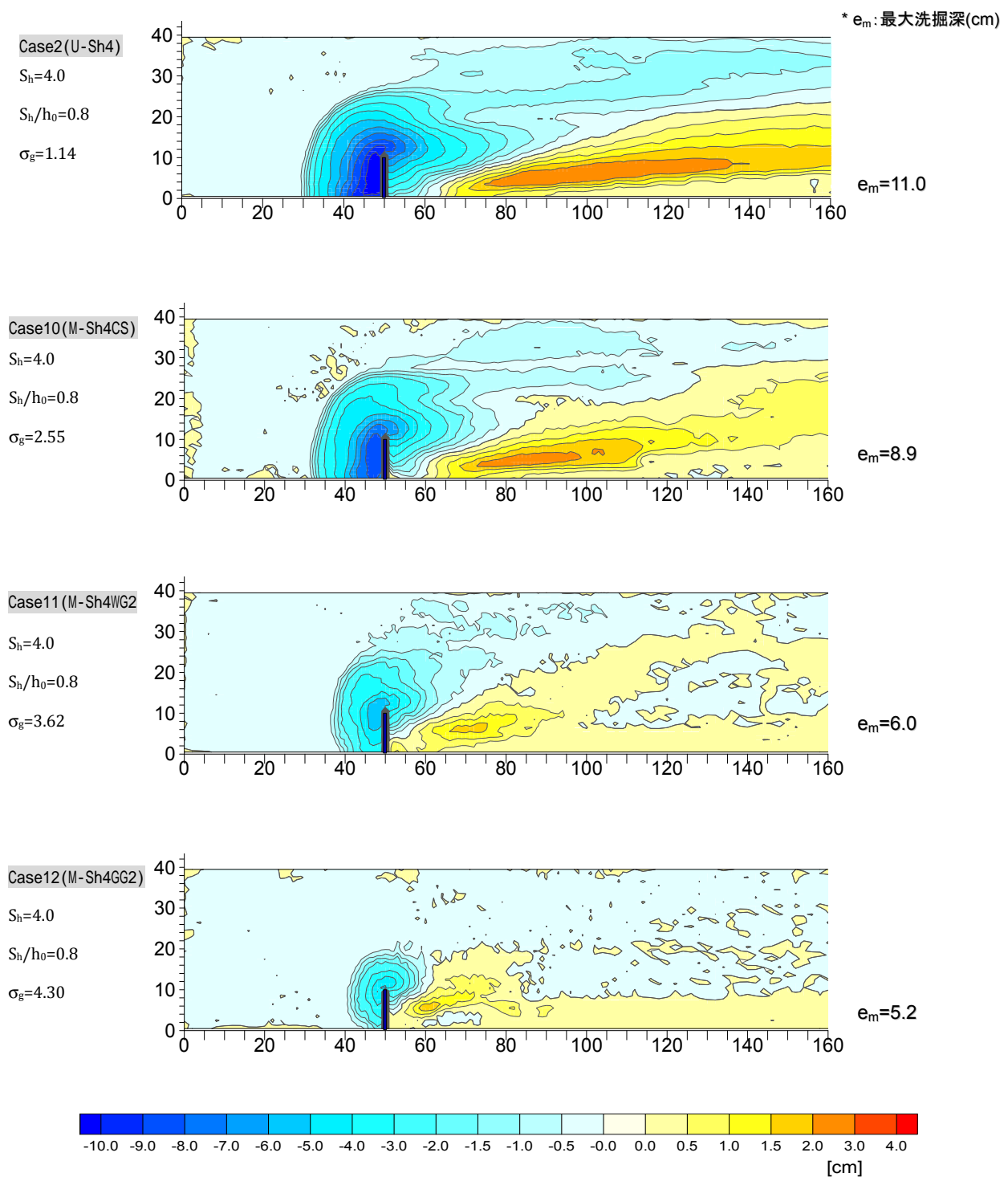


Fig. 4.17 通水3時間後の河床形状 ($S_h/h_0=0.8$ ケース)

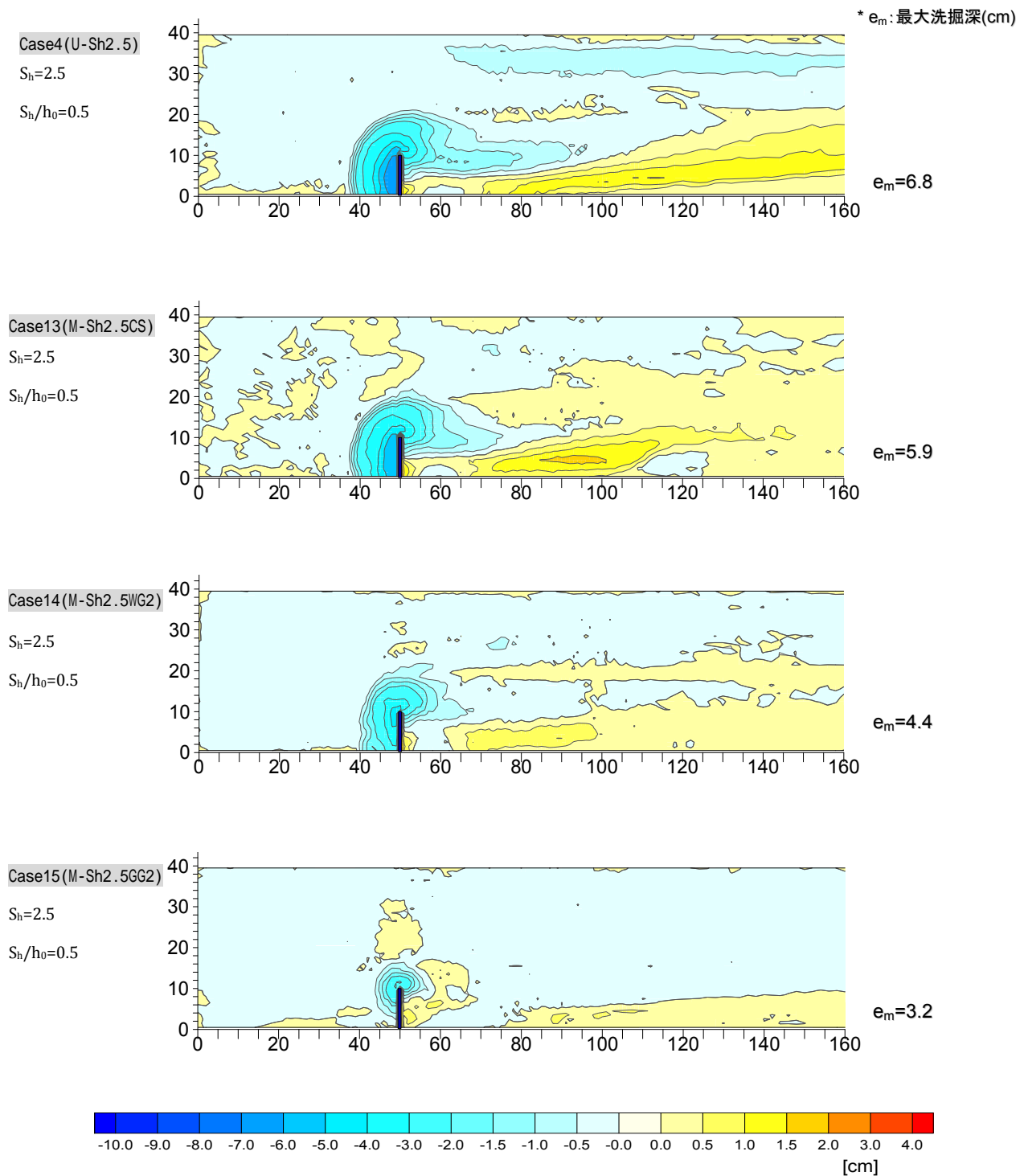
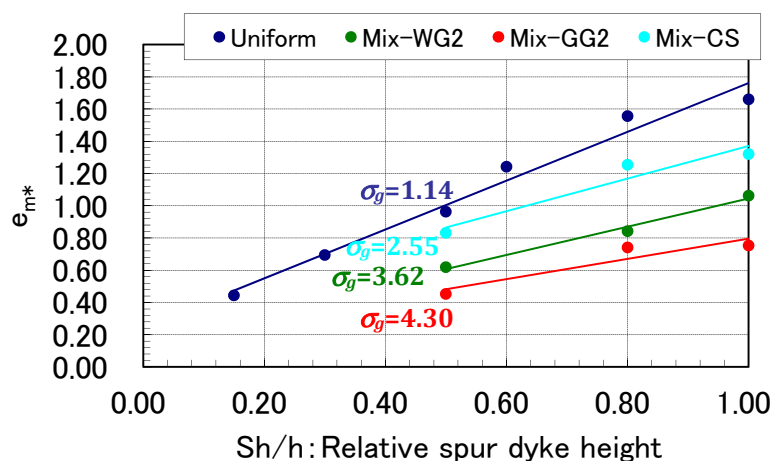


Fig. 4.18 通水 3 時間後の河床形状 ($S_h/h_0=0.5$ ケース)

Table 4.5 各ケースの洗掘孔の寸法

Case No.	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Case Name	M-NSCS	M-NSWG2	M-NSGG2	M-Sh4CS	M-Sh4WG2	M-Sh4GG2	M-Sh2.5CS	M-Sh2.5WG2	M-Sh2.5GG2
a/L	2.1	1.6	0.7	1.8	1.3	0.9	1.2	1.0	0.6
b/L	3.0	2.2	2.0	2.8	2.6	2.0	2.1	2.0	1.6
c/L	3.7	1.6	1.0	2.8	2.8	1.0	2.5	1.6	0.6
d/L	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\theta_1(^{\circ})$	20	21	34	26	25	28	26	22	25
$\theta_2(^{\circ})$	24	21	27	21	17	27	23	20	29
$\theta_3(^{\circ})$	12	17	16	13	15	25	13	13	22
$e_m(\text{cm})$	9.3	7.5	5.3	8.9	6.0	5.2	5.9	4.4	3.2
e_m^*	1.32	1.06	0.75	1.25	0.84	0.74	0.83	0.62	0.45
$V_s(\text{cm}^3)$	4026	1964	353	2826	1236	500	891	487	117
$D_{m0}(\text{mm})$	1.01	1.01	1.05	1.01	1.01	1.05	1.01	1.01	1.05
σ_g	2.55	3.62	4.30	2.55	3.62	4.30	2.55	3.62	4.30

Fig. 4.19, Fig. 4.20 には、各混合砂河床における相対水制高と最大洗掘深および洗掘量の関係を各河床材料条件別に色分けして示す。この図より、混合砂河床においても、均一砂河床と同様に相対水制高が大きくなるにつれて最大洗掘深および洗掘量も大きくなる傾向が見て取れる。



$$e_m^* = e_m / \sqrt{hL}$$

e_m : 最大洗掘深 h : 水深 L : 水制長 S_h : 水制の高さ

Fig. 4.19 最大洗掘深と相対水制高の関係

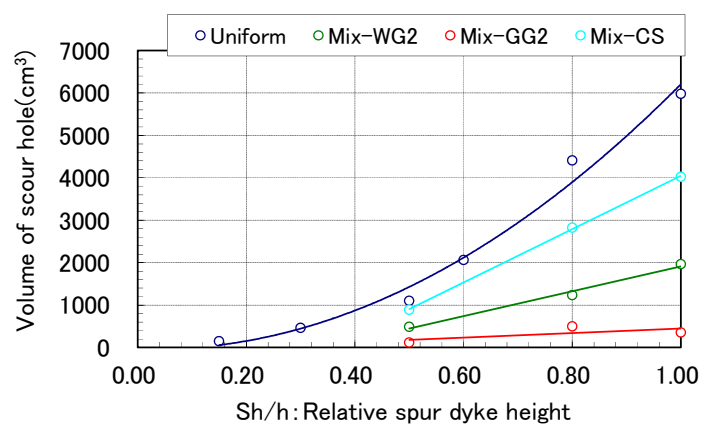


Fig. 4.20 洗掘量と相対水制高の関係

Fig. 4.21, Fig. 4.22 には最大洗掘深および洗掘量と河床材料の幾何標準偏差 σ_g との関係を示す。非越流時の実験と同様に、どの越流時の結果も σ_g が大きくなるにつれて洗掘深が小さくなる傾向を示す。そして、Fig. 4.23, Fig. 4.24 には水制頭部の河床表層粒度分布および粒径別割合の変化を示す。河床表層において、洗掘する過程で細粒分が減少し、粗粒化が進んだ状況が粒度分布および粒径別割合で確認でき、越流時においてもアーマ・コートが形成され洗掘が軽減されている。

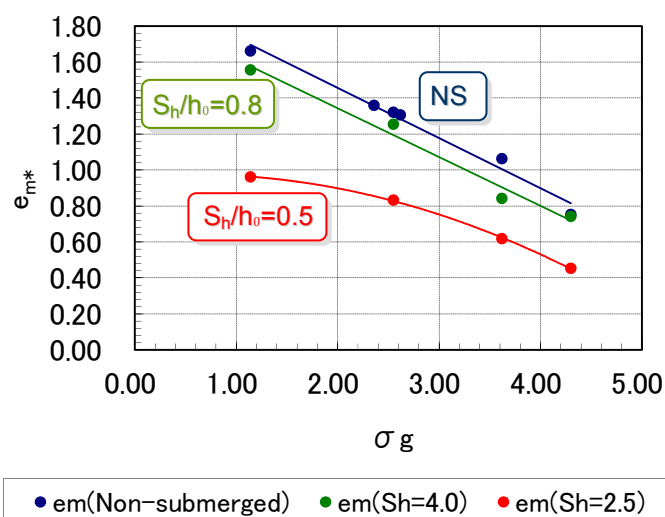


Fig. 4.21 各越流状態における最大洗掘深と幾何標準偏差の関係

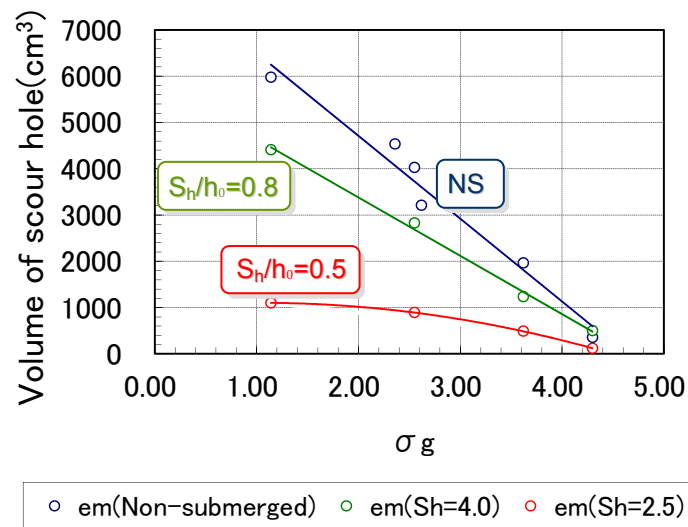


Fig. 4.22 各越流状態における洗掘量と幾何標準偏差の関係

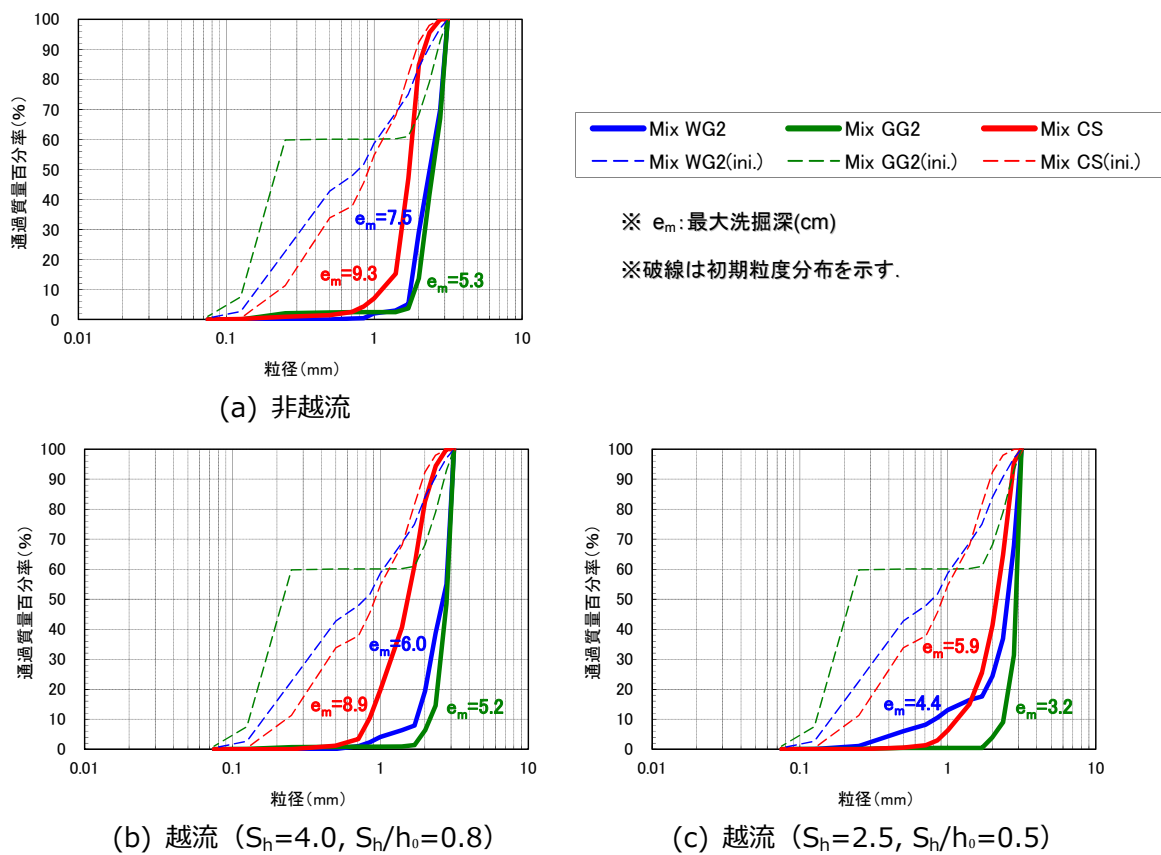


Fig. 4.23 水制頭部の粒度分布変化

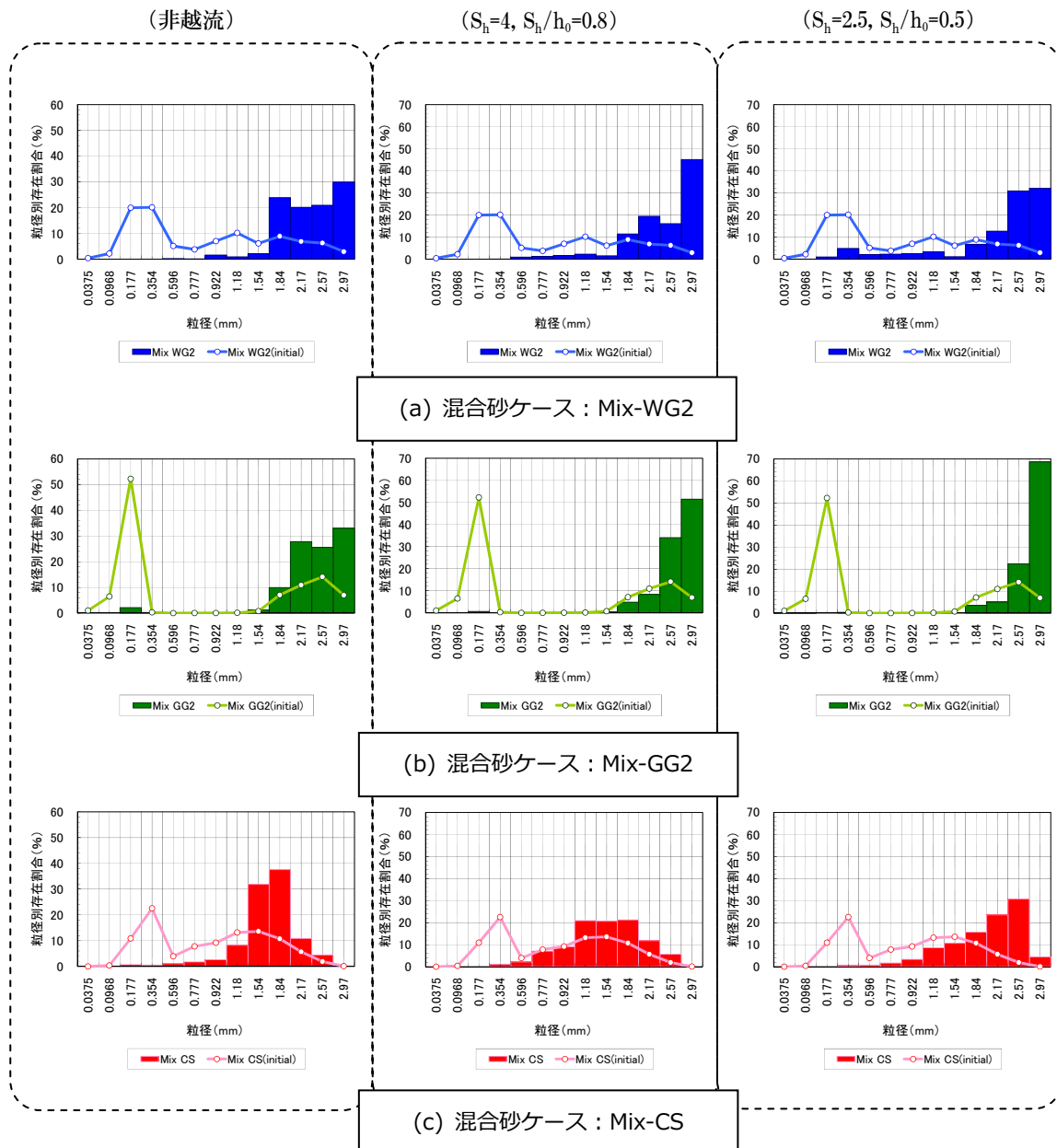


Fig. 4.24 河床表層の粒径別存在率の変化

また、水制背後域への堆積についても、Fig. 4.25 に示すように均一砂実験時と同様の傾向が混合砂河床においても確認できた。

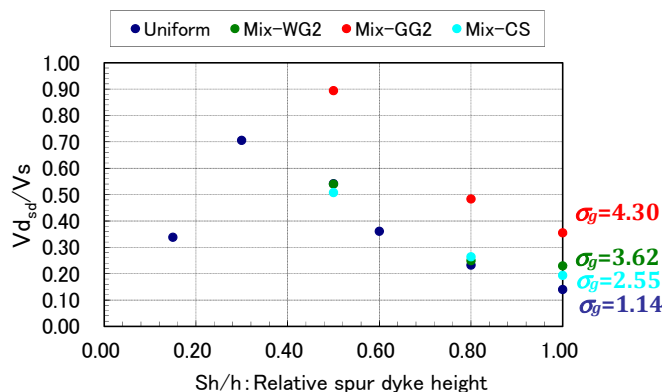


Fig. 4.25 水制背後への土砂堆積と相対水制高の関係

▼4.3.4 越流状態の違いが水制周辺の流れ場を与える影響

越流型・非越流型水制周辺の複雑な3次元流れ構造を把握するために、電磁流速計を用いた点計測によりいくつかの代表断面の流速場、そしてPIV法を用いて表層流れの解析を行った。この節では、非越流型および越流型水制実験の代表ケースについて行った3次元流れの計測結果を示し、考察を行う。

Fig. 4.26 には PIV 法によって解析された表層流れの流速ベクトルおよび流線図を示す。非越流状態洗掘河床の流れは3章で記述したように、水制から下流へ2L（水制長の2倍）の位置に湧昇域が発生し、扇状で放射線状の表層流れとなっている。それに対して、越流状態になると水制上部で水が流れ、表層においては阻害されることなく滑らかに下流へ流れている様子が確認できる。ただし、後述する水制背後の縦渦によって、越流型水制ケースの表層流れは、水制背後域において左岸へ屈折する表層流れが発生しており、その程度は水制高が低い程小さいことが流線図より確認できる。

Fig. 4.27 には $y=5\text{cm}$ の水制の中央位置の縦断面流速ベクトル図を示す。どの越流状態においても水制前面で下降流が発生し、洗掘孔内においては渦が発生して河床を洗掘している様子が流れ場から窺える。また、水制下流側については、非越流と $S_h/h_0=0.8$ ケース共に、水制頭部の底部から右岸側壁に向かって入り込む流れによって上昇流れとなっていることが確認できる。非越流ケースの表層流れは、湧昇域によって逆流域となっているが、越流ケース共に水制を越えてくる流水の影響を受け下流向きの流れとなっている。 $S_h/h_0=0.5$ ケースについては越流水の影響が大きく水制背後底部の近い領域のみ流速が弱まっている様子が確認できる。

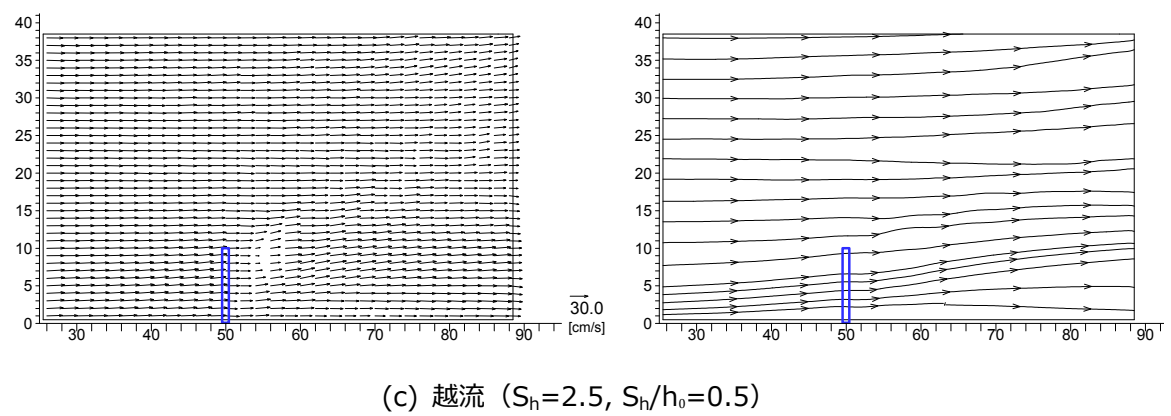
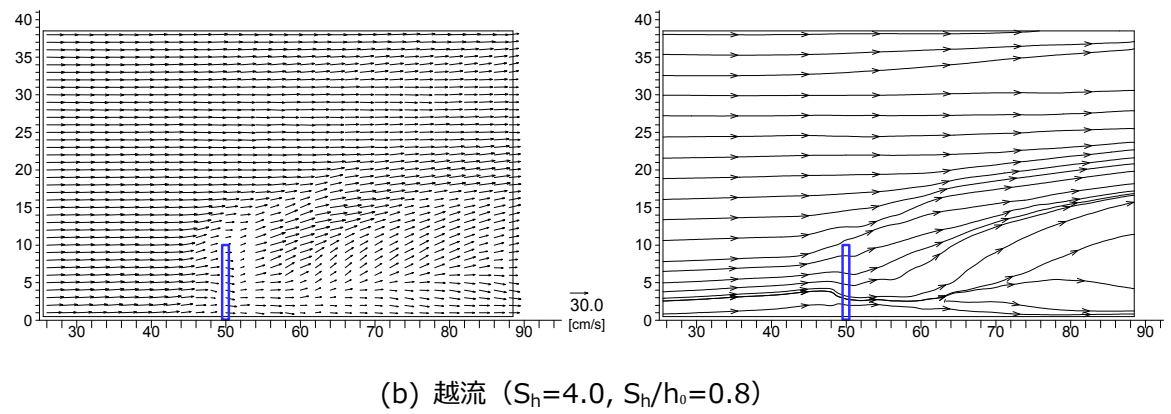
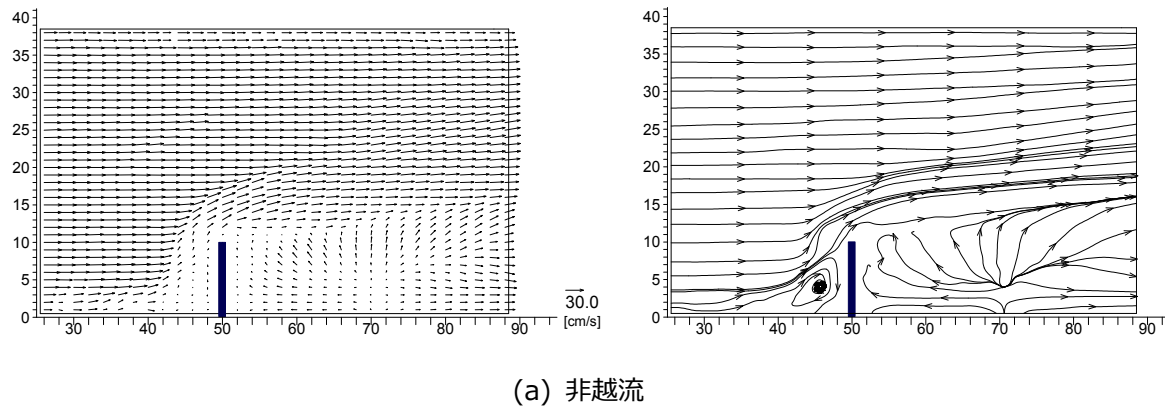
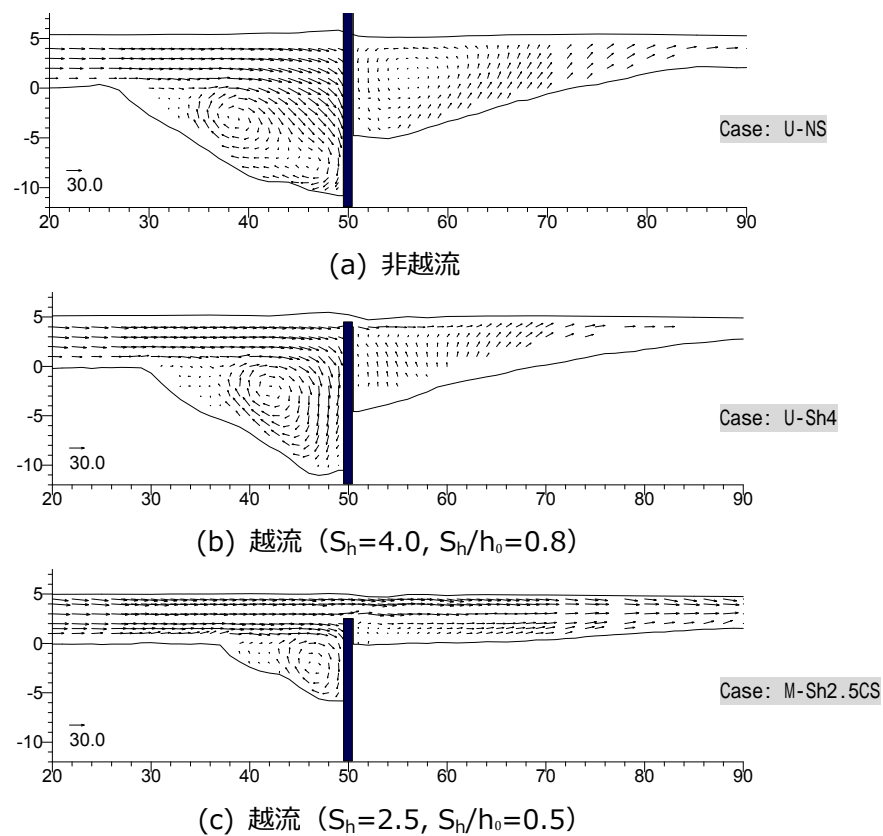


Fig. 4.26 PIV 法より解析された表面流速ベクトルおよび流線図

Fig. 4.27 縦断面 $y=5\text{cm}$ の流速ベクトル図

ほぼ平衡状態に達した洗掘河床において、水制前面に存在する渦の中心位置は非越流ケースが最も水制設置位置から遠く、水制高が低いほど水制に近づいている。Fig. 4.28 に水制前面の渦の中心位置にあたる $y=5\text{cm}$, $z=-2\text{cm}$ 縦断の鉛直流速比較図を示す。水制前面においての渦の上昇流および下降流の鉛直流速の大きさについては、ケース間でそれ程大きな差が見られないが、下降流の発生している幅は、水制が高いほど上流側に広いことが計測結果より示された。準平衡河床時の流速場の計測のため鉛直方向の流速の差があまり大きくないが、準平衡時の河床形状の違いから洗掘の進行が活発な過程においては、ケース間で鉛直流速が異なってくる可能性は高いと考えられる。

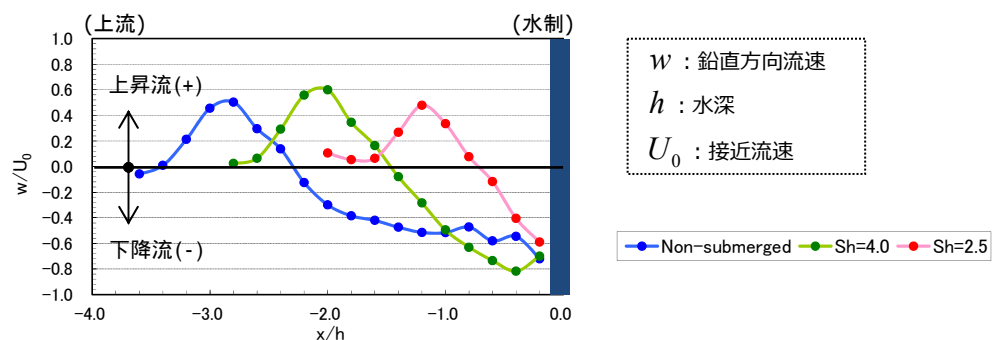
Fig. 4.28 縦断 $y=5\text{cm}$, $z=-2\text{cm}$ の鉛直流速(w)比較図

Fig. 4.29 には $y=15\text{cm}$ 位置の縦断面流速ベクトル図を示す。 $y=15\text{cm}$ の位置は洗掘の深い領域が水制先端から下流へ伸びる特徴的な位置である。そして、 $y=15\text{cm}$ の縦断面位置については、Fig. 4.26 (a) の表面流れの流線図より確認できるように、非越流条件において水制前面にあった流水が水制により水が刎ねられ流水が集中する位置であるため、圧力勾配により下降流が発生する位置である。Fig. 4.29 の水制設置位置の洗掘孔内上流側における上昇流については、馬蹄形渦による上昇流が発生している領域である。水制設置位置から下流にかけて下降流が発生しており、その下降流の大きさと縦断範囲については水制が高い程大きいことが計測結果より確認できる。

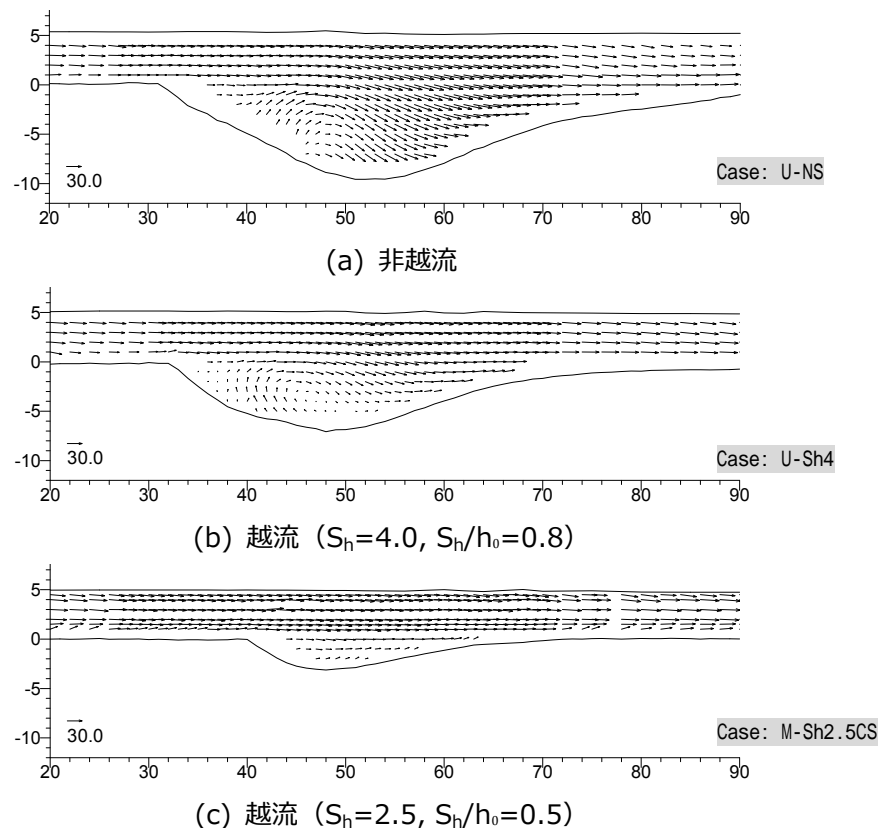


Fig. 4.29 縦断面 $y=15\text{cm}$ の流速ベクトル図

Fig. 4.30 には $y=15\text{cm}$, $z=-1\text{cm}$ 縦断の洗掘孔内の鉛直流速比較図を示す。非越流ケースは水制位置より下流において接近流速の4割程度の大きさの顕著な下降流となっており、その範囲も広い。この下降流によって、非越流ケースにおいて水制頭部とその下流域の洗掘が越流ケースに比べて大きくなったことがわかる。また、水制高が低くなれば水制頭部の下降流の大きさと範囲が小さくなるのがこの図より確認できる。Fig. 4.30 では $S_h/h_0=0.5$ ケースにおいて下降流域が存在しないが、これは後に示す横断図より確認できるが、下降流域が存在しないのではなく、水制が低くなると水制頭部の下降流域が横断方向にも狭くなるために、水制高の低い $S_h/h_0=0.5$ ケースは $y=15\text{cm}$ の位置では下降流とはなくなってしまったためである。

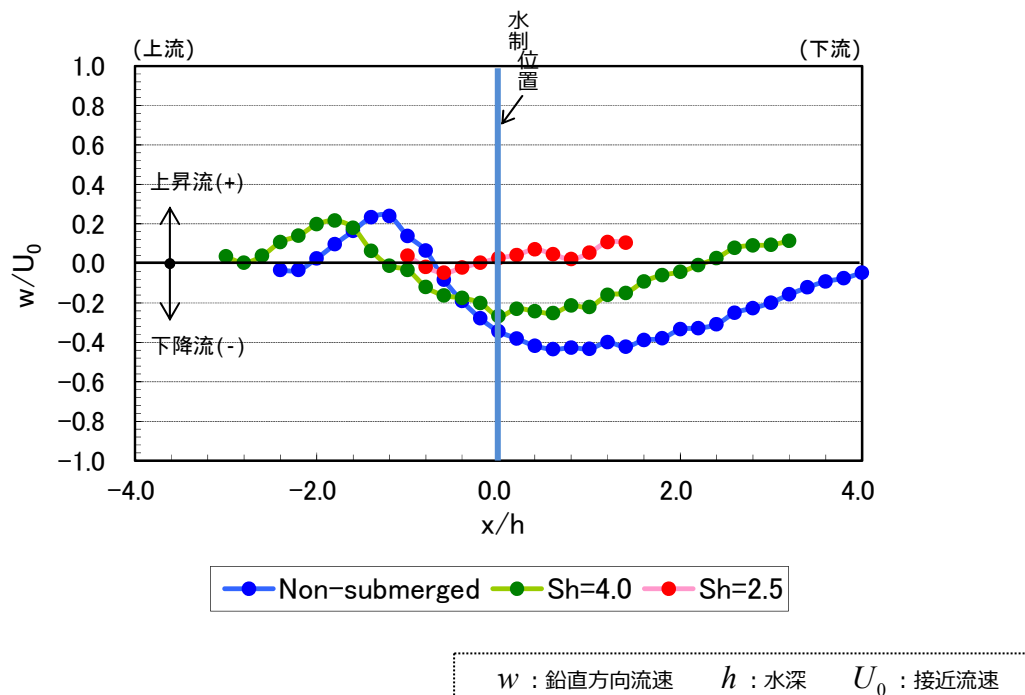
Fig. 4.30 縦断 $y=15\text{cm}, z=-1\text{cm}$ の鉛直流速(w)比較図

Fig. 4.31, Fig. 4.32 には非越流および越流 $S_h/h_0=0.8, 0.5$ ケースの $x=45\text{cm}, 50\text{cm}, 55\text{cm}, 65\text{cm}$ 位置の横断面の流速ベクトル図を示す。横断面図より、水制前面から曲げられた馬蹄形渦の存在と、水制頭部における下降流領域、そして水制背後に馬蹄形渦と逆回転である後流渦の存在が確認できる。また、それらの縦渦によって Fig. 4.26 に示す水制背後域の表層流れが支配されていることが確認できる。 $x=45$ 断面では、どのケースも河床地形に沿って上る馬蹄形渦の上昇流が見られる。 $S_h/h_0=0.5$ ケースは他ケースと比べて洗掘孔が小さく水制前面の渦の下降流域が小さいために、 $x=45$ 断面では下降流域が計測されていないが、Fig. 4.27 より水制前面の $x=48$ から水制までの範囲では下降流域が発生している。水制設置位置である $x=50$ 断面においては、水制先端近くで顕著な下降流がどのケースも確認できる。ただし、その下降流が駆動力となっている馬蹄形渦については、非越流状態では顕著に存在しているが、水制が低くなると徐々に弱まり、 $S_h/h_0=0.5$ ケースにおいては水制頭部の馬蹄形渦が計測からは確認できない。水制背後の $x=55$ 断面においては、水制先端近辺の下流域において下降流が発生しており、水制背後の後流渦は共通して見られる。非越流ケースについては馬蹄形渦が $x=55$ 断面においても顕著であり、左岸方向へ斜面を上る流速ベクトルも大きい。 $x=65$ 断面でも同様に、後流渦はどのケースも確認できるが、馬蹄形渦については非越流状態のみ確認できる。

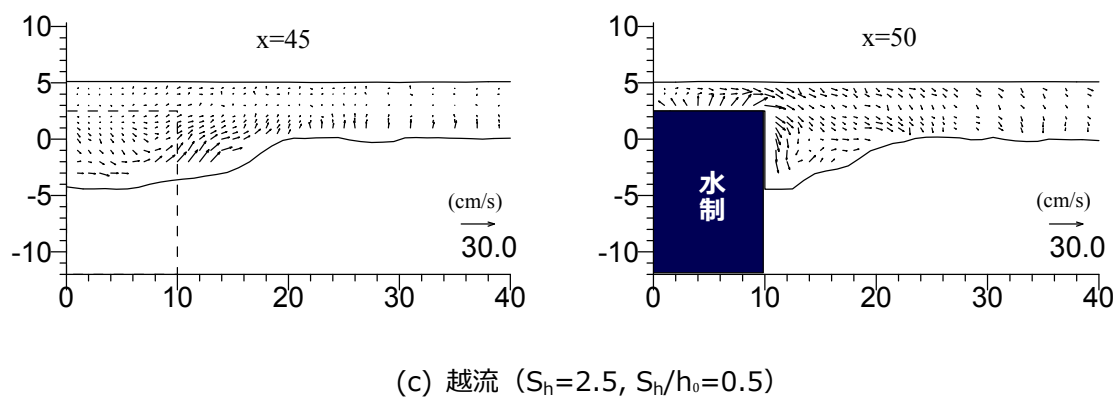
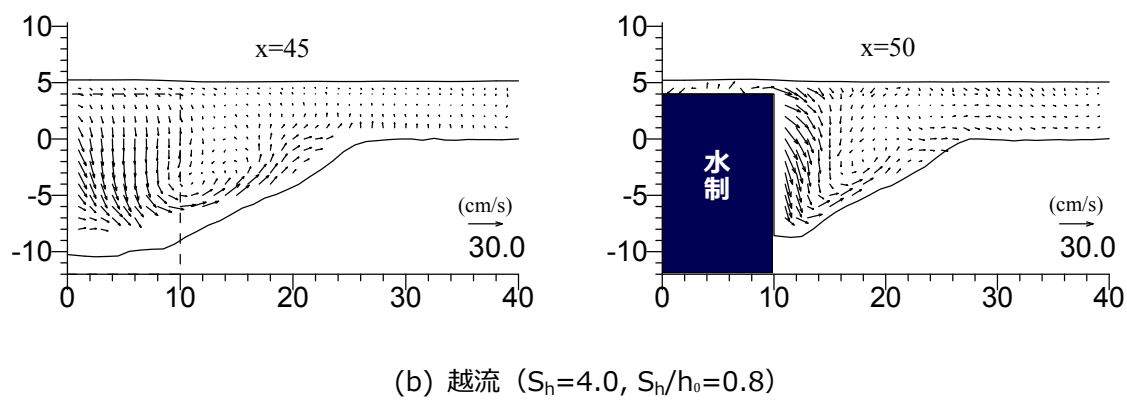
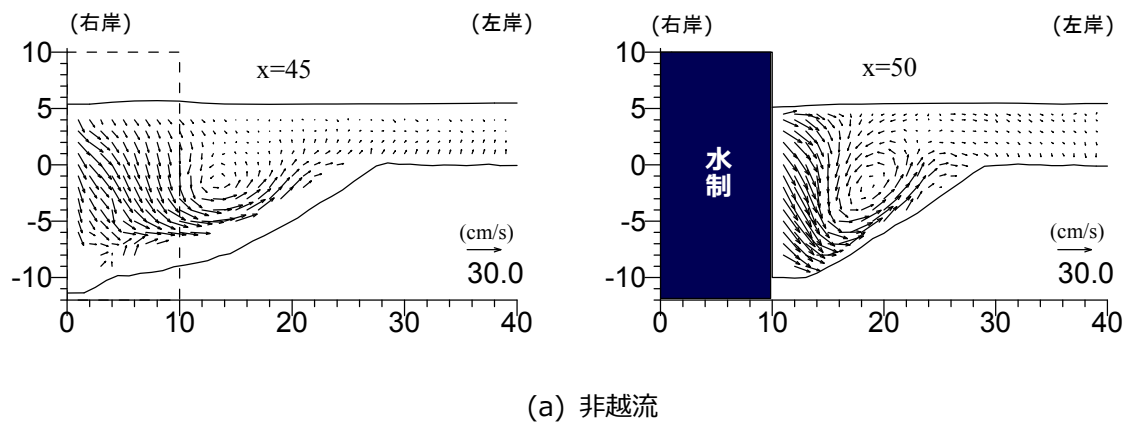


Fig. 4.31 $x=45, 50$ 断面流速ベクトル図

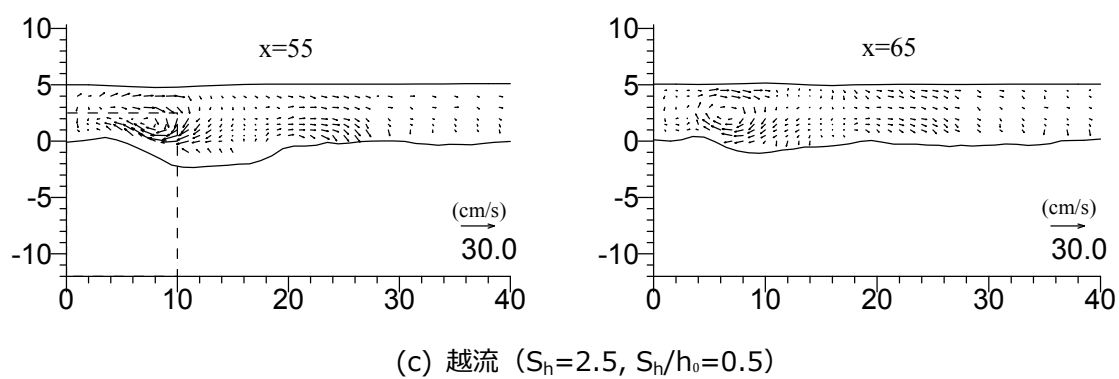
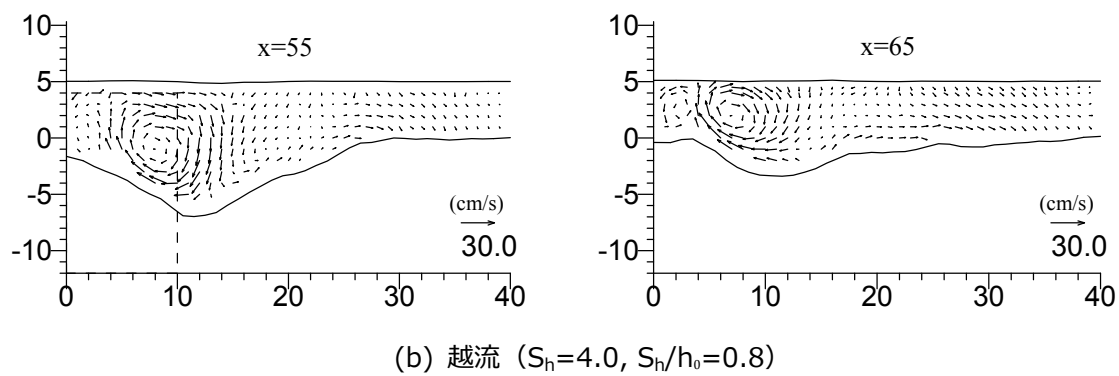
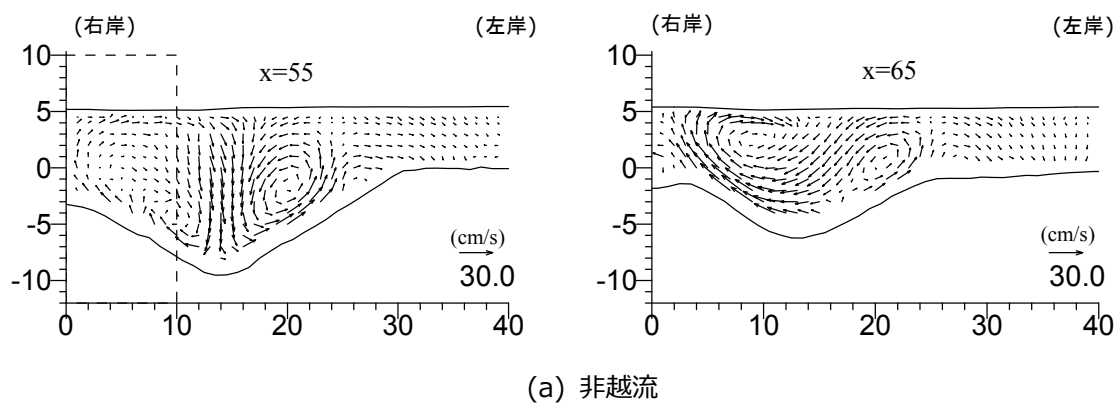


Fig. 4.32 $x=55, 65$ 断面流速ベクトル図

Fig. 4.33 には河床から一律 1.5cm の高さの平均流速を計測した底面近傍流れのベクトル図を示す。底面近傍の流れは、河床近傍掃流力の平面分布を把握するだけでなく、砂粒の輸送経路を把握するのにも有効である。どの越流状態においても、水制前面から水制頭部領域にかけて、馬蹄形渦により河床近傍において洗掘孔の縁に向かう流れが発生している。洗掘孔の縁近辺では流れが衝突し流速が局所的に弱くなっており、その地点では流速ベクトルの変化も大きいことが特徴的である。水制設置による洗掘進行によって、水制背後域だけでなく水制上流側の洗掘孔の縁部分も局所的に流速が弱く淀んだ領域が形成されていることが確認できた。また、水制頭部の下流領域においては、各越流ケース共通して水制背後へ向かう流れが存在している。以上のように、水制周辺の洗掘孔河床近傍の流れ場は、流れの 3 次元性、特に渦構造によって支配されており、流速ベクトルの変化が激しいことが示された。

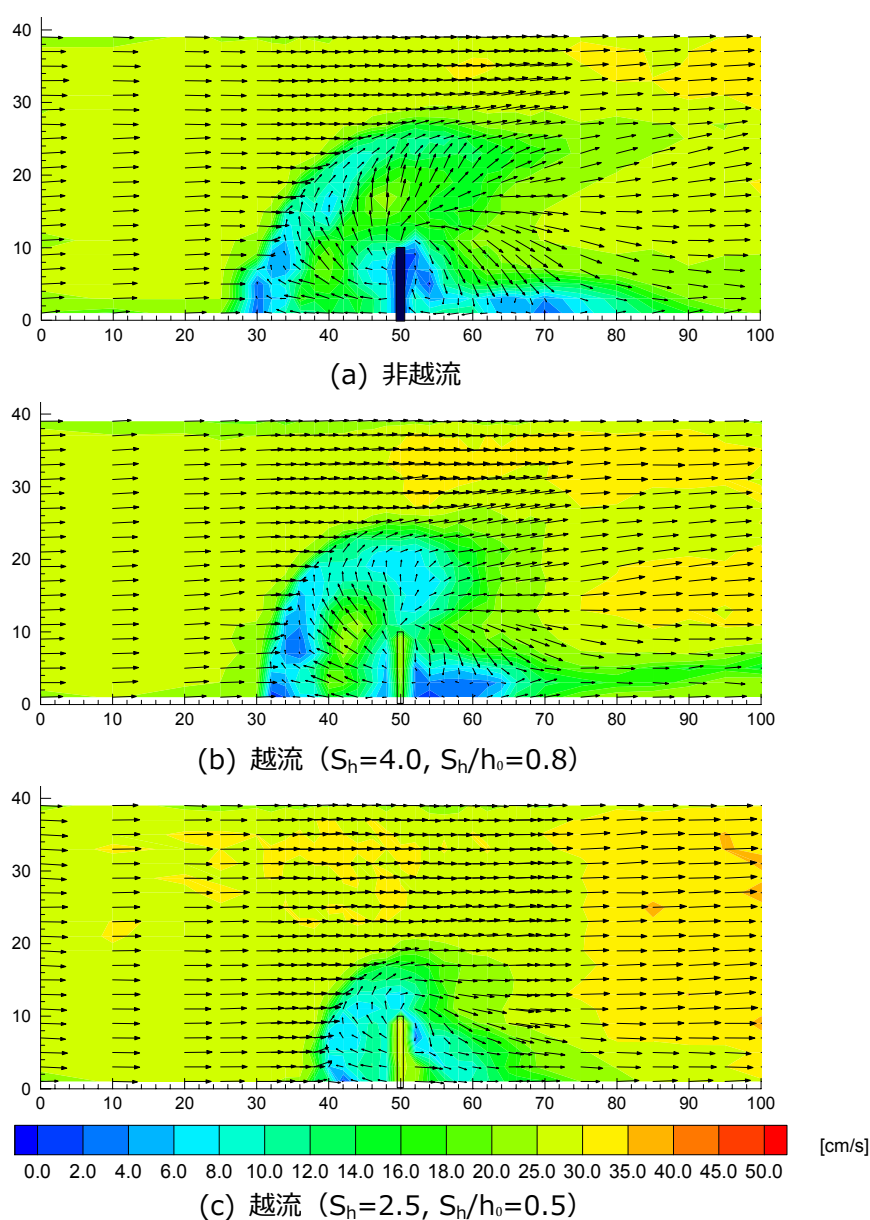


Fig. 4.33 底面付近の流速ベクトル図

水制高の違いが水制頭部近辺の鉛直流速に対してどのような影響を及ぼすのかを把握するために、水制設置断面である $x=50\text{cm}$ の鉛直方向の流速についての比較を行った。Fig. 4.34 には流速計測地点の共通の高さである $z=2.0, 1.0, 0.0, -1.0\text{cm}$ の鉛直流速の各ケース比較図を示す。この図より水制頭部の下降流については水制高が高い程大きな値を示し、その下降流域の横断方向の幅も大きいことが確認できる。これは、水制高の影響が水制頭部への流水集中度の違いを生んだ結果であると考えられる。非越流状態では、Fig. 4.26 に示すように水制を迂回して主流部の流れと衝突する流水の量が多いが、越流状態においては水制上部では水がそのまま下流へと流れ、水制頭部に集まる流水が減少する。そのため、水制頭部の流水集中による鉛直方向の圧力勾配が弱まり、結果として水制高が小さい程水制頭部において下降流が弱まる結果となったと考えられる。

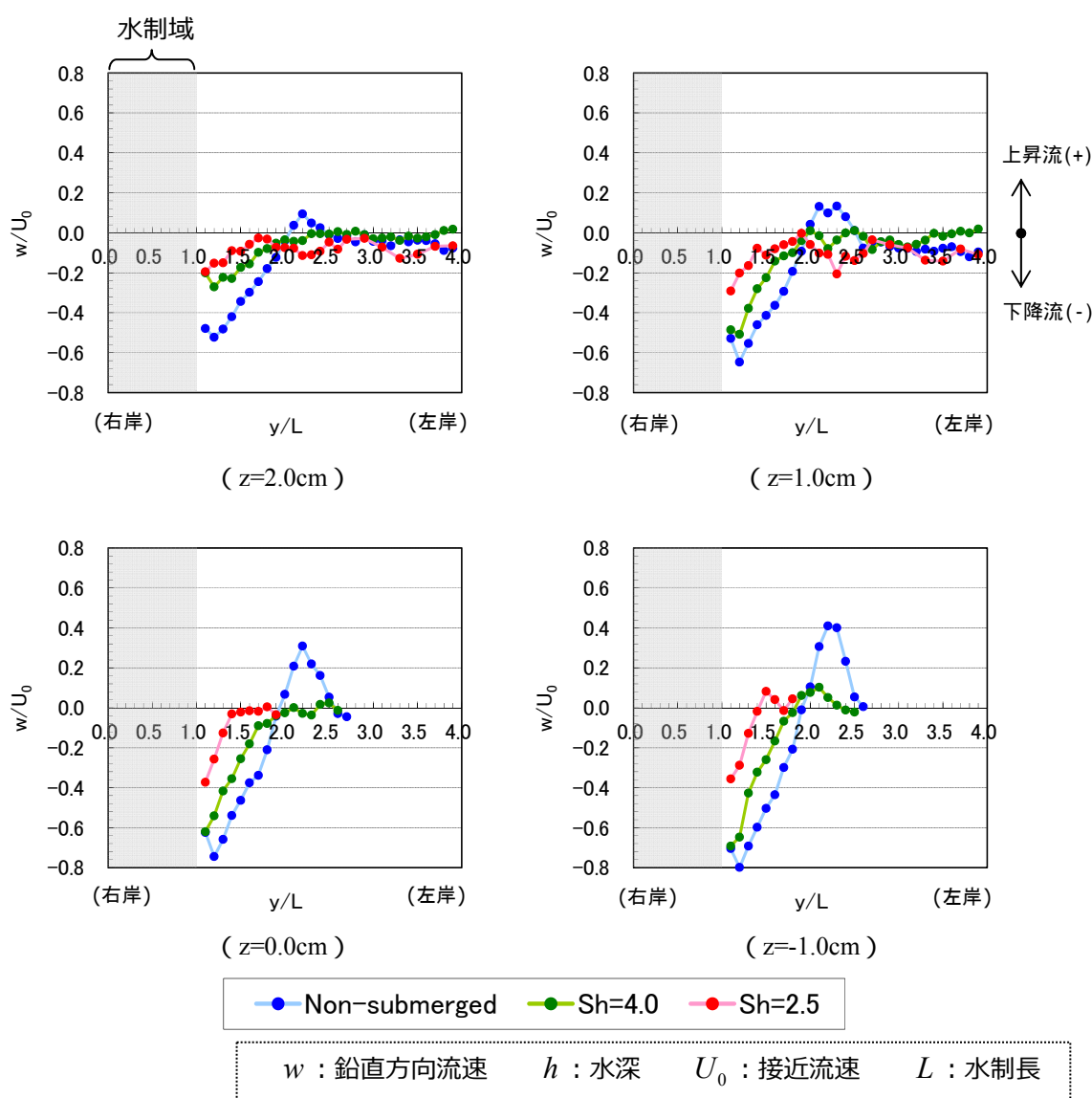


Fig. 4.34 各越流状態における水制頭部近辺の鉛直流速の比較

次に各越流状態において、底面近傍の横断方向流速について比較を行った。Fig. 4.35 は $x=45, 50, 55, 60, 65, 70\text{cm}$ 横断面における底面近傍の横断方向流速について、各ケースを比較した図である。縦軸が横断方向の位置を示し、横軸が横断方向の流速 (v) を示し、プラス (+) は左岸方向、マイナス (-) は右岸方向の流れを表している。

水制先端から左岸側 $1.0 < y/L < 2.5$ の水制頭部近傍の範囲において、非越流状態が最も左岸方向の流れが大きく、水制高が低くなる順にその値が小さくなっていることが図より確認できる。この原因については、前述した水制頭部近傍の鉛直流速に密接に関係すると考えられ、水制頭部における下降流が弱いと馬蹄形渦の流れが弱まり、また河床近傍において左岸方向への流れが小さくなることが原因と考えられる。

$y/L < 1.0$ の水制背後域へ回り込む右岸方向への流れについては、基本的には非越流状態が最も流れが大きく、水制高が低くなる順に値が小さくなっており、また水制下流側の右岸方向流れの縦断範囲は水制高が大きい程長いことが Fig. 4.33 から確認できる。しかし、水制の長さ程度の水制直背後域については、右岸方向の流れが各ケースとも大きいことは共通しているが、右岸方向流速の大きさの順序が異なっている。Fig. 4.35 の水制直背後域 $x=55\text{cm}$ より非越流状態の右岸方向への流れが越流ケースと比べると若干小さい結果となっている。これは、Fig. 4.27 (a) の縦断面図に示すように、水制直背後は非越流時には下降流域、そして Fig. 4.33 (a) より水制直背後域の底部においては平面渦が存在するのに対し、越流状態においては水制直背後は上昇流、そして底部には平面渦はなく縦断方向に軸を持つ顕著な縦渦が存在するため、越流と非越流では水制直背後域において渦構造が異なっていることが原因と考えられる。水制直背後域において基本的な流れの構造が越流と非越流状態で異なっているため、右岸方向流れの大きさの傾向が他領域と前後したと考えられる。

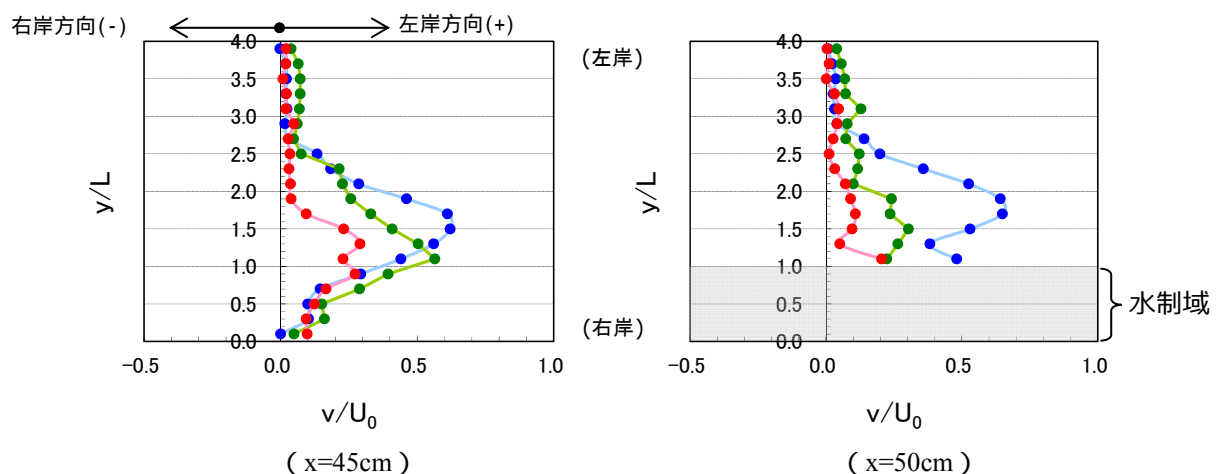


Fig. 4.35 各越流状態の底面近傍横断方向流速の比較 (1/2)

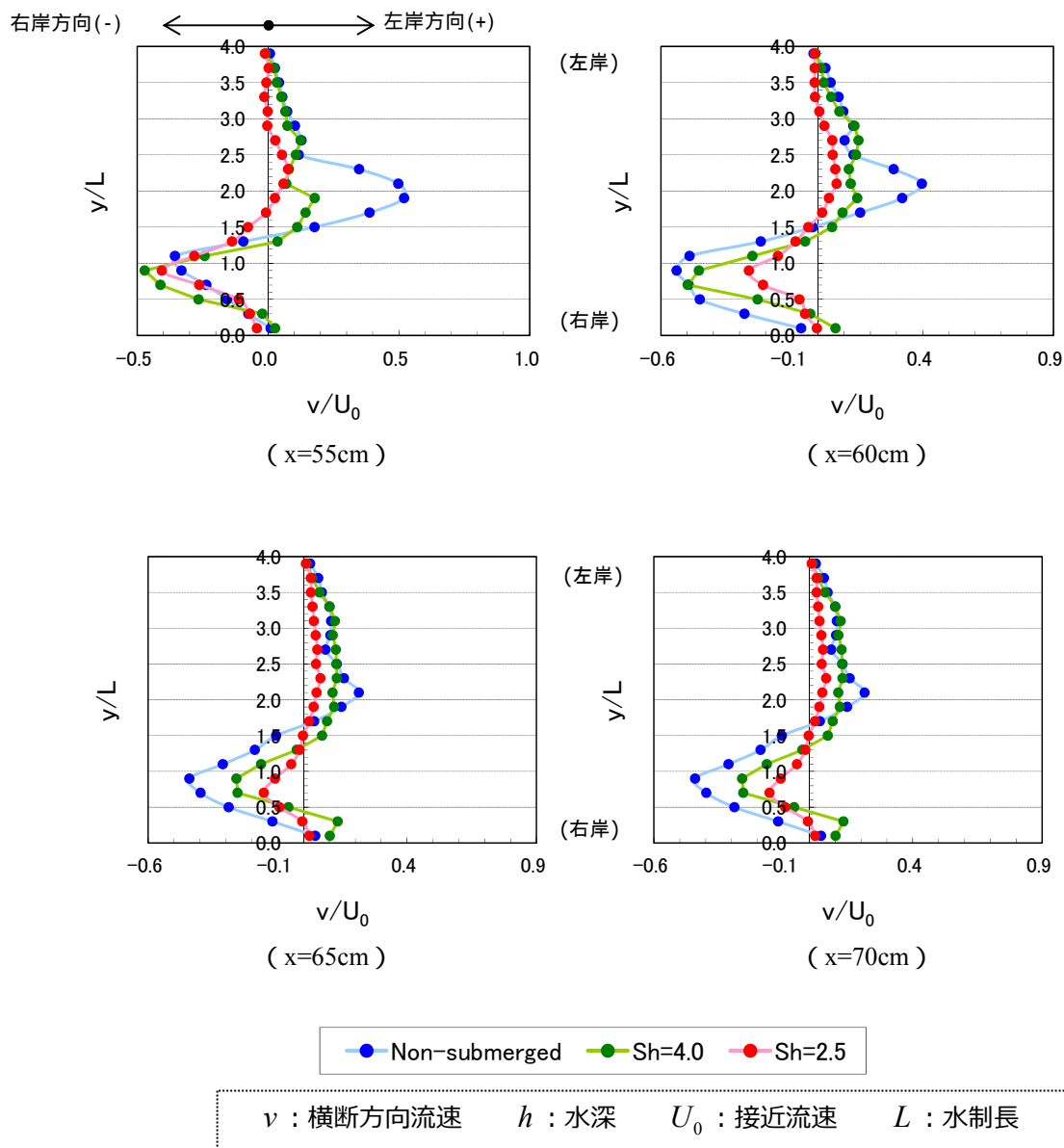


Fig. 4.35 各越流状態の底面近傍横断方向流速の比較 (2/2)

▼4.3.1 水制高と河床粒度分布変化の関係

Fig. 4.36 には、非越流、そして水位高 $S_h=4.0, 2.5$ の2つの越流状態について、また Mix-CS 混合砂ケースの通水後河床表層の平均粒径について計測地点毎に色で値を示している。そして、Fig. 4.37 には平均粒径の計測結果を初期の平均粒径で除した値を示し、粒度分布の初期からの粗粒化および細粒化を暖かい色と冷たい色に分けて示している。

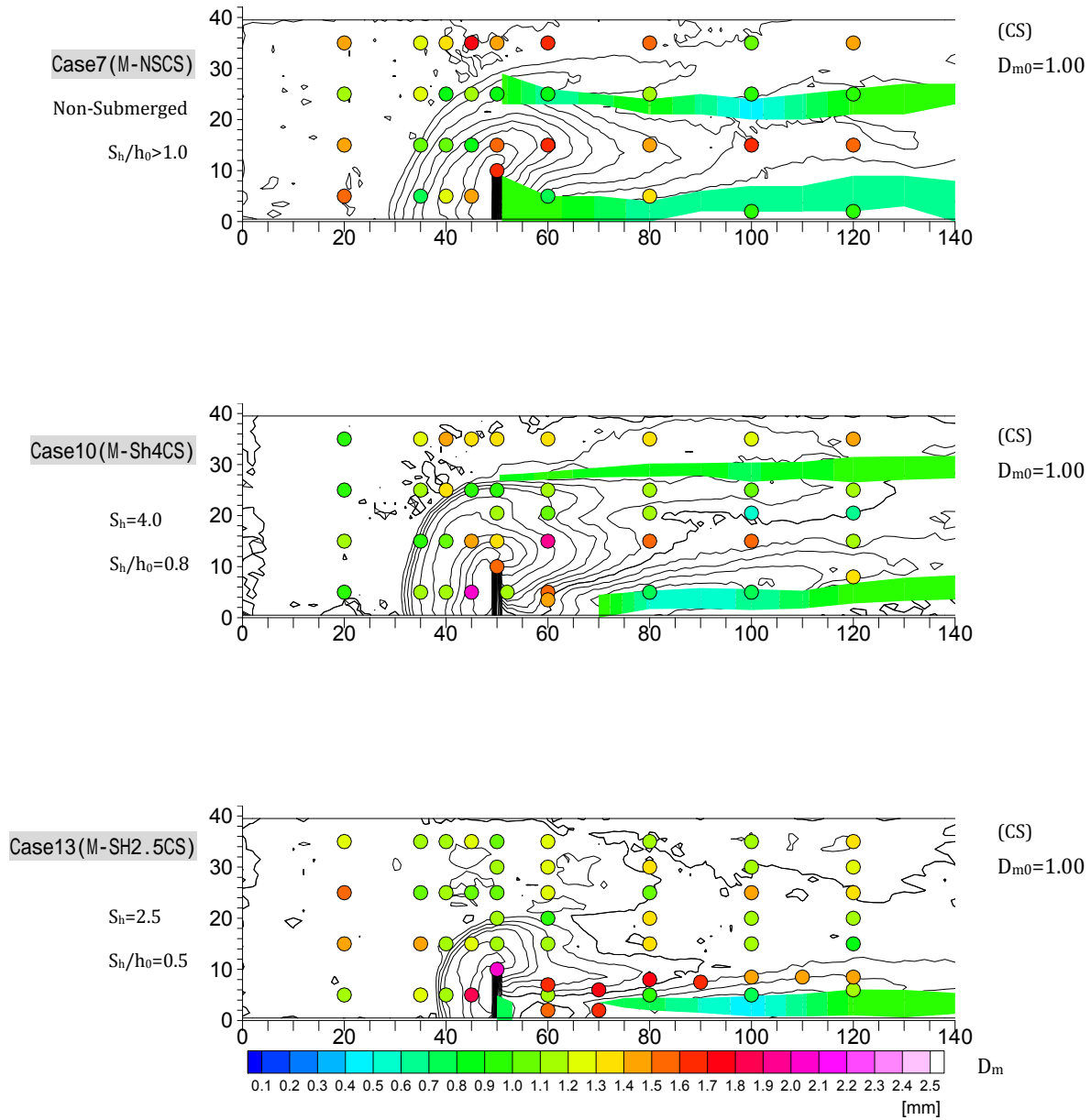


Fig. 4.36 河床表層の平均粒径(D_m)

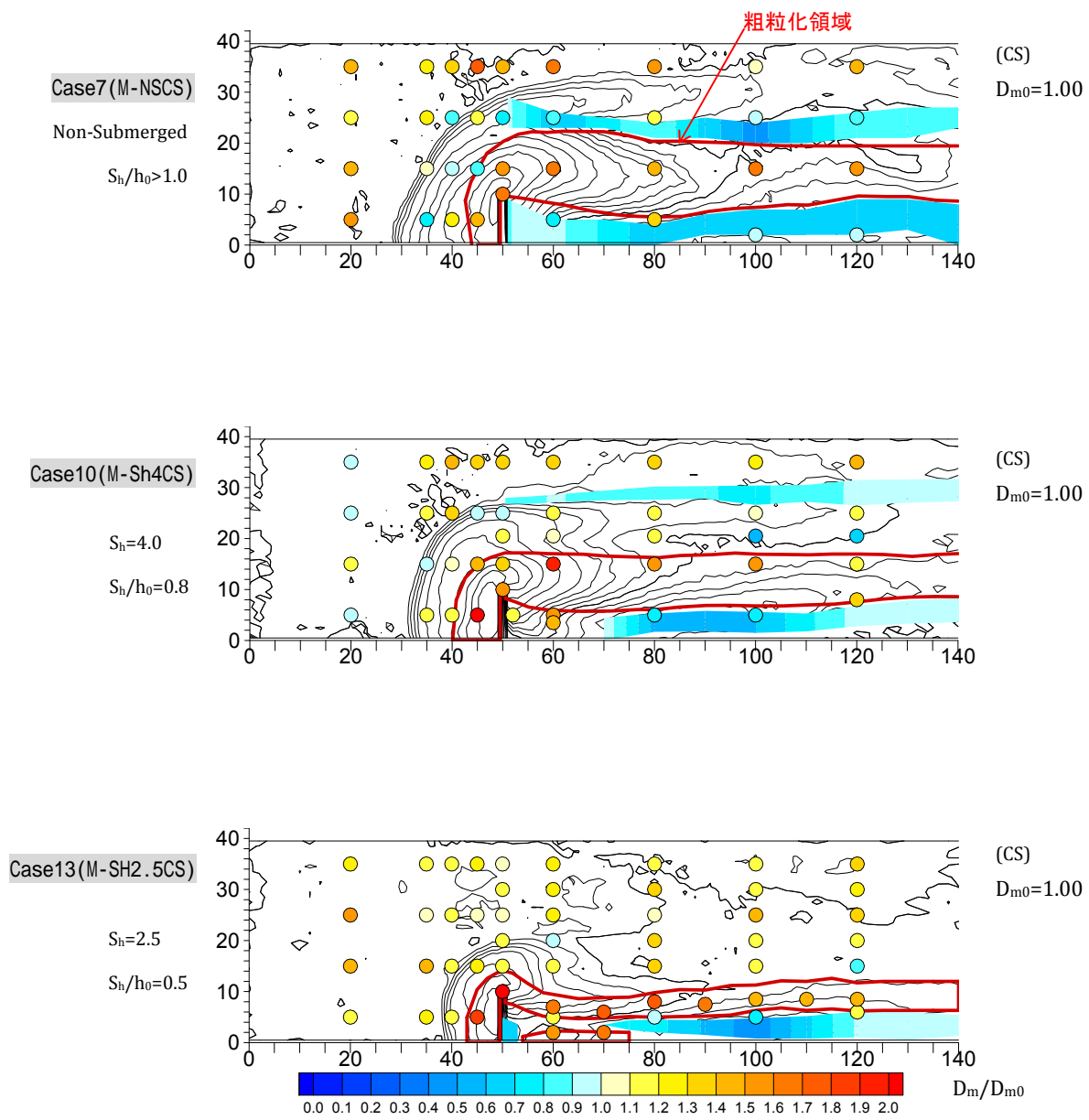
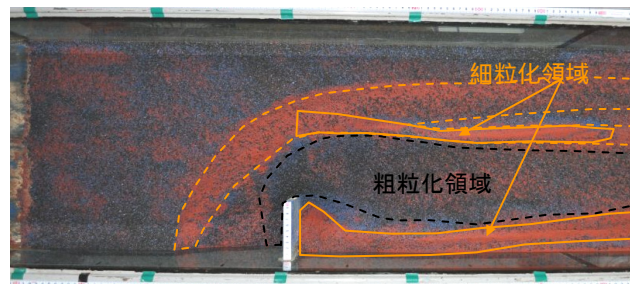


Fig. 4.37 河床表層の粒度変化(D_m/D_{m0})

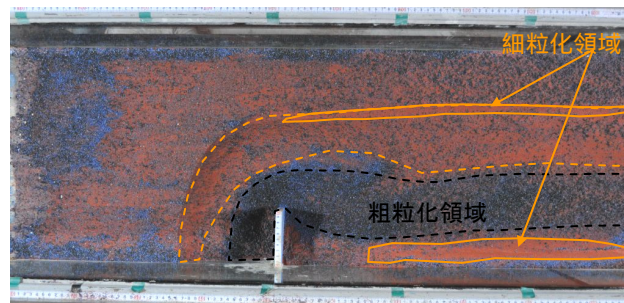
基本的には、clear-water 条件の実験であるため、水制の効果により水制位置近辺の主流域については流速が相対的に大きくなり、小さな砂粒が下流へ運ばれ粗粒化が進むことになる。Fig. 4.38 にはカラーサンドを用いた各越流状態の通水3時間後の河床表層撮影画像を示す。洗掘が進行し、準平衡河床時においては、越流ケースも非越流ケースと同様に水制前面および頭部とその下流領域において共通して粗粒化が進行している。3章で記述したように馬蹄形渦による洗掘孔底部から洗掘孔縁へと向かう河床近傍流れと洗掘孔の河床勾配によって分級現象が生じ、混合砂河床の準平衡河床において洗掘孔内底部では共通してアーマ・コートが形成されている。

Non-submerged
 $S_h/h > 1.0$



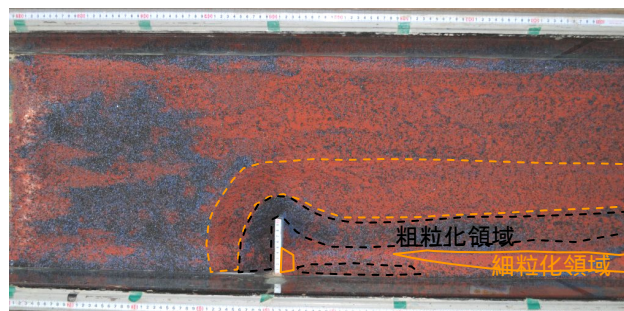
(a) 非越流

$S_h=4.0$
 $S_h/h_0=0.8$



(b) 越流 ($S_h=4.0$, $S_h/h_0=0.8$)

$S_h=2.5$
 $S_h/h_0=0.5$



(c) 越流 ($S_h=2.5$, $S_h/h_0=0.5$)

Fig. 4.38 河床表層の粒度変化 (カラーサンド)

水路中央側の帯状の細粒化領域については、カラーサンドケースにおいて非越流時には比較的顕著に形成されていたが、 $S_h/h_0=0.8$ ケースではその細粒化領域が非越流ケースに比べて細く形成され、 $S_h/h_0=0.5$ ケースでは細粒分の帯状領域が明確には形成されない結果となっている。越流ケースにおいては、細粒分が輸送過程において局所的に集まって運搬されず、Fig. 4.38 (b), (c) の赤破線で示し

た領域で分散して下流に運搬されている様子がインターバル撮影画像より確認され、非越流ケースに比べ細粒分が洗掘孔の縁に集中し難い状況にあったと考えられる。これは先に示した河床底面近傍において、越流ケースは非越流ケースに比べて左岸方向の流れが小さくなっていることが原因と考えられる。また Fig. 4.33 に示すように、非越流ケースでは水路中央側の細粒化領域が形成される位置において、馬蹄形渦によって流れが幾分上向きとなり局所的に河床近傍流速が低減されているが、越流ケースについてはその馬蹄形渦が顕著に存在しないために、流れが上向きに偏向することによる底面流速の低減域が形成されていない。この越流と非越流間の掃流力の違いが細粒化領域の形成に影響したことも、原因の一つと考えられる。

そして、どの混合砂河床を用いた実験においても、水制背後域に縦断方向に伸びる細粒化領域が形成された。これについては、どの越流状態においても水制頭部から水制背後域へ向かう細粒分を運ぶ河床近傍流れが存在していたことを意味しており、洗掘孔の河床勾配に逆らって後流渦が細粒分をより水制背後へと運搬したと考えられる。

越流ケースについては、Fig. 4.38 (c) に見られるように水制直背後において局所的な細粒化領域が存在し、その細粒化域の下流側（水制位置から水制の長さ程度の位置）に粗粒化域、そしてその粗粒化域の下流側に長く細粒化域が作成されている。この粗粒化域については、非越流ケースでは見られない現象で非常に特徴的である。これは Fig. 4.39 に示すように、平坦河床上的の越流状態の水制背後には、水制上部を越えてくる流速の大きな流水によって水制背後に横断方向に軸を持つ渦が形成され、その渦によって水制直背後へと向かう河床近傍流れが発生し、水制直背後領域に細粒分が運搬されたと考えられる。その水制を越えた流水が河床へ再付着する地点は、水制高 $S_h = 2.5\text{cm}$ ケースでは水制高の5倍程度のところに位置し、底面渦による逆流域の長さも $5S_h$ であった。ただし、水制背後の横断方向に軸を持つ底面渦は、Fig. 4.27 (c) に示すように洗掘河床上的の流れでは存在しておらず、水制周辺が洗掘することによって水制背後の流れ場も変化することが示されており、従って越流型水制背後の細粒化小領域は洗掘の初期過程で形成されたものと考えられる。

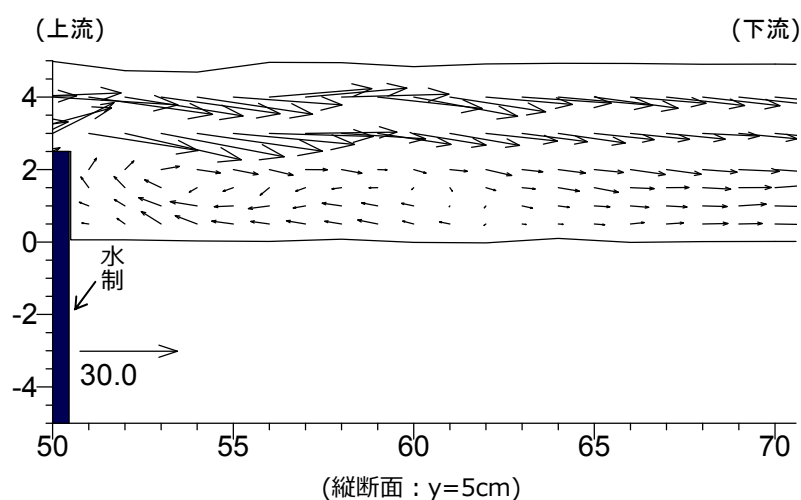


Fig. 4.39 越流ケース($S_h = 2.5$, $S_h/h_0 = 0.5$)平坦河床における水制背後の流速ベクトル縦断図

(水制高と粗粒化域の横断幅の関係)

Fig. 4.40 には水制設置位置から下流に伸びる粗粒化域の横断方向の幅について示しており、カラーサンドを用いた混合砂ケースの撮影画像 (Fig. 4.38) より各越流状態について測定し比較を行った。本実験条件においては、ほぼ平衡河床となった状態における粗粒化域の幅 (B_c) は、非越流時が最も広く平均としては水制長の 1.2 倍程度で、水制高が小さくなる順でその幅は小さくなっており、Fig. 4.38 から確認できるように主流路側 (左岸側) の粗粒化領域が水制が低くなることによって小さくなっている。また Fig. 4.40 に示すように、その平均値が相対水制高と線形関係を持つように見えるが、本実験の 3 ケースのみでは信憑性に欠けるために、この点についてはさらなる実験データの蓄積が必要と考えている。ただし、相対水制高と粗粒化域幅の関係については、粗粒化域を作成する縦渦が水制頭部域の下降流を原動力としており、そして、その下降流の大きさが相対水制高と密接に関係しているため、水制高と粗粒化域幅のこの傾向は尤もらしいと推察される。

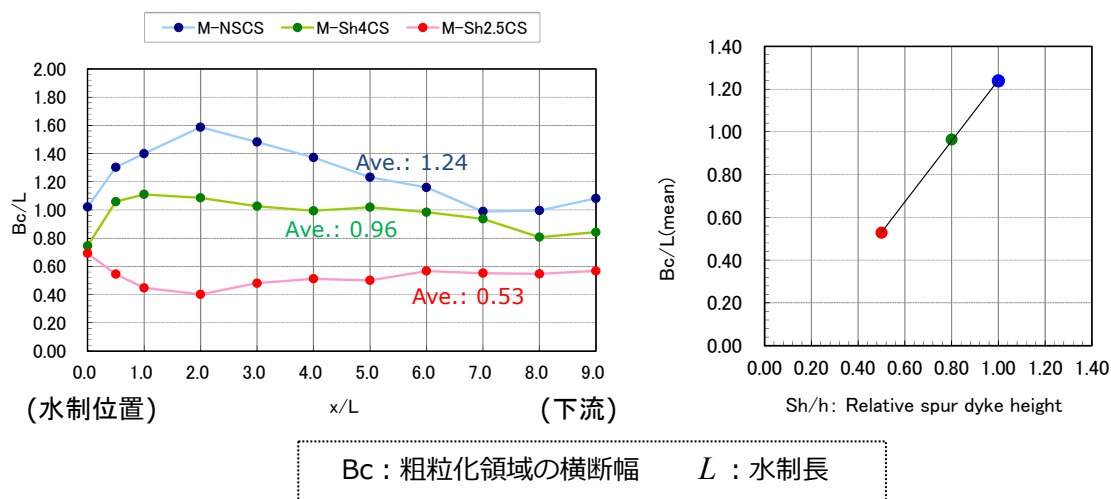


Fig. 4.40 粗粒化域横断幅の比較

4.4 まとめ

本研究では、越流状態の水制が河床地形および粒度変化にもたらす影響を明らかにするために、水制の高さを変化させた均一砂および混合砂河床の移動床実験を行った。水制の高さと局所洗掘の関係、水制高と水制背後への堆積の関係、水制高の異なる 3 ケースの洗掘河床における 3 次元流れ場の計測結果について比較し、そこから、水制高の違いがもたらす河床表層の粒度分布変化についても考察を行った。本実験で得られた結果をまとめると以下ようになる。

1. 水制高と河床変化の関係

- (1) 同一粒径の均一砂河床を用いて相対水制高のみを変化させた実験により、最大洗掘深については相対水制高（Overtopping ratio の逆数）とほぼ線形関係にあることを示し、水制周辺の洗掘深を予測する上で相対水制高が重要なパラメータとなることを示した。
- (2) 越流状態におけるほぼ平衡状態の洗掘孔の大きさ（洗掘量）は、水制上流側の方が大きく、この関係は越流状態では崩れない。そして、相対水制高が大きくなるにつれて水制上流側の洗掘がより大きくなり、その分、水制背後域の堆積が大きくなる傾向を示す。
- (3) 非越流に近い越流状態と非越流状態の水制がつくりだす準平衡状態の河床高比較から、水制高が非越流になることによって水制上流側の洗掘の拡大よりも水制頭部下流側において洗掘が進む傾向が示され、越流状態内で相対水制高が高くなると進む平面的な洗掘傾向とは異なることが明らかとなった。
- (4) 洗掘過程後半の水制上流側と横断方向の洗掘孔拡大は、主に水中安息角による砂のずり落ち現象に支配されるために、その洗掘孔の平面的な大きさは、最大洗掘深と線形関係に近いことが実験結果より示された。また水制の直背後についても水制先端に向かって水中安息角程度の河床勾配となり、水制頭部の洗掘の進み具合で洗掘が進行することが示された。
- (5) 水制背後域への土砂堆積量は、越流状態において相対水制高が大きくなれば水制背後への土砂堆積量は大きくなる傾向を示すが、非越流時が最大とはならず、非越流に近い越流状態で最大となることが示された。また、水制周辺の洗掘量に対する水制背後域の土砂堆積割合と見た場合、相対水制高が極端に小さい場合を除き、相対水制高が低いと洗掘した土砂は水制背後域へ堆積する割合が高いことが分かった。

2. 粒度分布が越流時の河床洗掘に与える影響

- (6) 各混合砂においても、均一砂河床と同様に相対水制高が大きくなるにつれて最大洗掘深および洗掘量が大きくなる傾向を示すことが分かった。そして、非越流型水制の実験結果と同様に、どの越流時の結果も σ_g が大きくなるにつれてアーマ・コートが形成されるまでに必要な洗掘深が小さくなり、最大洗掘深が小さくなる傾向が示された。

3. 水制高の違いが洗掘河床の流れ場に与える影響

- (7) 準平衡状態の洗掘孔内における水制前面の流れ場において、馬蹄形渦による上昇流および水制前面の下降流の鉛直流速については、水制高の異なるケース間ではそれ程大きな差が見られないが、下降流の発生している幅は、水制が高いほど上流側に広いことが計測結果より示された。
- (8) 水制先端から下流へ伸びる洗掘の深い領域において、非越流時が最も下降流の大きさとその縦断及び横断方向の範囲が大きく、水制高が低くなる程その下降流の大きさと範囲が小さくなることを計測結果より示された。
- (9) 水制頭部近傍において水制高が高くなると下降流が強まり、馬蹄形渦の流れも強くなるため、

水制先端から主流路側 $1.0 < y/L < 2.5$ 範囲の洗掘孔内の河床近傍において、洗掘孔底部から斜面を駆け上がる左岸方向の河床近傍流れは水制高が高い方が大きいことが示された。

- (10) 水制背後へ回り込む右岸方向の流れについては、基本的には非越流状態が最も流れが大きく、水制高が低くなる順に値が小さくなり、その水制背後へ向かうベクトルが存在する縦断範囲についても相対水制高が大きいほど広いことが示された。ただし、水制設置位置から水制の長さ程度の直下流域においては、越流と非越流で流れの構造が異なるために、非越流時の水制背後へ回り込む流れが弱いことも明らかとなった。
- (11) 水制設置による洗掘孔拡大によって、水制背後域だけでなく水制上流側の洗掘孔の縁部分にも局所的に流速が弱く淀んだ領域が形成されることが示された。

4. 水制高の違いが河床表層の粒度変化与える影響

- (12) 本実験の越流状態において、どの混合砂河床を用いた実験ケースにおいても水制背後域に細粒化領域が形成され、流れ場の計測によって非越流時と同様に、水制背後域へ細粒分を運ぶ顕著な後流渦が計測された。
- (13) 非越流実験では比較的顕著に形成された水路中央側の帯状細粒化領域については、越流状態ではその幅が狭くなり、水制高が低いケースにおいてはその細粒化領域が明確に形成されないケースも確認され、越流時は非越流状態に比べて水路中央側の帯状細粒化領域が形成され難いことが確認された。
- (14) 越流状態の洗掘の初期過程において、水制背後に横断方向に軸を持つ底面渦より逆流域が形成され、水制直背後に細粒化領域、そしてその下流に局所的な粗粒化領域が形成されることが確認された。
- (15) 水制頭部から下流に伸びる粗粒化域の横断方向の幅については、非越流時が最も広く水制高が小さくなるにつれて粗粒化幅が小さくなる傾向が示された。

参考文献

- 1) 富永晃宏・中野義郎・藤田亨良 (2000)：越流型水制域内の流れ構造の可視化解析, 水工学論文集, 第44巻, pp.1041-1046.
- 2) 富永晃宏・中野義郎・井嶋康二・長坂剛(2000)：越流型水制域内の流れ構造に及ぼす相対水制高の影響, 応用力学論文集, Vol.3, pp.805-812.
- 3) 富永晃宏・井嶋康二・中野義郎 (2001)：斜め越流型水制周辺の流れ構造の PIV 解析, 水工学論文集, 第45巻, pp.379-384.
- 4) 富永晃宏・井嶋康二 (2002)：越流型水制周辺の流れ構造に及ぼす水制間隔の効果, 水工学論文集, 第46巻, pp.475-480.
- 5) 富永晃宏・田本典秀 (2004)：越流型連続水制周辺の流れ構造に及ぼす水制設置角度の効果, 水工学論文集, 第48巻, pp.805-810.
- 6) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001)：Movable bed scour around submerged spur-dikes, *Annual Journal of Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol.45, pp.373-378,2001.
- 7) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001)：Characteristics of scour around repelling spur-dikes, proceedings of the 29th IAHR Congress, Beijing, China, Theme D, Vol. II, pp. 343-349.
- 8) Elawady, E., Michiue, M., Hinokidani, O. (2001)：An investigation of scour around attracting spur-dikes, proceedings of the 8th International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements, pp. 111-118.
- 9) 人川直之, 道上正規, 檜谷治, Emad Elawady (2000)：越流型不透水制の局所洗掘に及ぼす水制諸元の影響, 土木学会中国支部第52回研究発表会, 平成12年度, pp.179-180.

水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する数値解析

5.1 概説

水制工設置による周辺河床の洗掘孔形状の予測に関する検討は、これまで精力的に行われきており予測精度も向上しているが、現段階では水制工がもたらす粒度分布の変化を数値解析モデルによって予測する試みはこれまでほとんどなされていない。現在、河川環境を意識した水制設置が求められている中、水制工がもたらす河床変化だけでなく粒度変化をも予測できる解析モデルの需要は高い。しかしながら、水制周辺の洗掘過程だけでなく粒度分布の空間的な変化まで精度よく再現できる信頼性に足る数値解析モデルは、現段階では開発されていないようである。粒度分布の精度向上が河床地形の予測精度向上へと繋がるため、河床形状だけでなく粒度分布を含めた再現検証が今後のさらなる予測モデルの精度向上には重要と考えられる。2章で記述した既往研究のレビューより、水制周辺の流れと河床変動解析を精度良く行うためには、少なくとも三次元の流れ解析を行う必要性和、後述する流砂モデルにも一工夫する必要性があると考えられる。水制等の河川構造物周辺の河床変動及び粒度変化シミュレーションにおいて、流れ解析モデルおよび流砂モデルにおいて高度なものをそれぞれ選択する必要がある、プログラムの開発と計算に多くの時間が必要になること、そして水理模型実験や現地データにおいて粒度分布を調査したデータが非常に少ないことが、これまで開発の遅れている原因と考えられる。

本研究では、3章および4章で得られた実験データを用いて、水制工設置による周辺河床の洗掘孔形状と粒度分布の変化を精度良く予測可能な数値解析モデルを構築することを目的としており、解析モデルの詳細については、次節以降に記述する。

5.2 掃流砂のモデリング

▼5.2.1 平衡掃流砂量式

掃流砂 (Bed load) とは、絶えず河床と接触を保ちながら移動する砂の輸送形態を表し、その中においても滑動 (sliding)、転動 (rolling)、跳躍 (saltation) に分類されることがある。その掃流砂のモデリングについては、単位時間当たりの移動量である流砂量を求めるものと、砂

粒の運動を一粒一粒シミュレートするものが存在するが、断面積分モデルの一次元河床変動解析や水深積分モデルの平面二次元河床変動解析で用いられるものは前者の流砂量を計算する式やモデルを用いている。

掃流砂量式を導くにあたって、モデル化の考え方の違いで2つに分けられる¹⁾。一つ目は、

$$\text{掃流砂量} = (\text{単位時間} \cdot \text{単位面積当たりの離脱率 (離脱体積)}) \times (\text{跳躍距離})$$

二つ目は、

$$\text{掃流砂量} = (\text{単位面積当たりの移動体積}) \times (\text{移動速度})$$

である。

(Einstein 型の掃流砂量式)

Einstein²⁾が発表した研究より、一つ目の考え方に基づいた掃流砂量式は Einstein 型の掃流砂量式、または確率変数を用いていることから確率モデル (stochastic model) とも呼ばれている。Einstein は、掃流砂の運動は Fig. 5.1 に示すように長時間の休止状態と短時間の運動状態の繰り返しであることを観察より見出し、rest period (休止時間) と step length (1回の砂粒の移動距離) を掃流砂の運動を特徴づける要素とした。

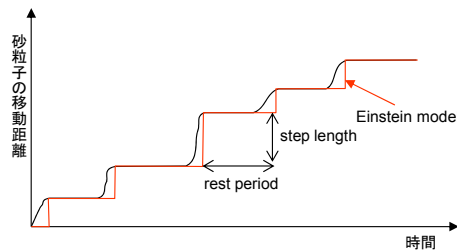


Fig. 5.1 Einstein の zig-zag モデル

多くの砂粒粒子の rest period を測定することは容易ではないため、多くは砂粒子の単位時間・単位面積当たりの離脱粒子数 (pick-up rate) を代替している。そして、一般に Einstein 型の平衡掃流砂量式は、pick-up rate p_s (平均 rest period の逆数) と平均 step length Λ を用いて次式のように記述される。

$$q_B = \frac{A_3 d}{A_2} p_s \Lambda \quad (5.1)$$

ここで、 q_B は単位幅掃流砂量、 A_2 、 A_3 は 2 次元及び 3 次元の砂粒子形状係数 ($=\pi/4, \pi/6$) で、 d は砂の粒径を表す。この式の意味するところは、単位時間にある場所を通過する砂粒は、検査面上流側の長さ Λ の領域から pick-up した砂粒で、単位幅を考える場合は上流側の面積は Λ となり、その範囲内から pick-up される砂粒数は範囲内の全砂粒数 $\Lambda / A_2 d^2$ に離脱率 p_s を乗

じたもので、最後に掃流砂量に換算するために砂粒 1 個の体積 $A_3 d^3$ を乗じて単位幅の掃流砂量を表現している。この式のパラメータで勿論重要となるのは、pick-up rate p_s と平均 step length Λ の評価となる。

(Kalinske 型の掃流砂量式)

二つ目の掃流砂量のモデル化の考え方については、Fig. 5.2 に示すように河床近辺の薄い層（掃流層）における粒状体からなる場を考えて掃流砂をモデル化している。

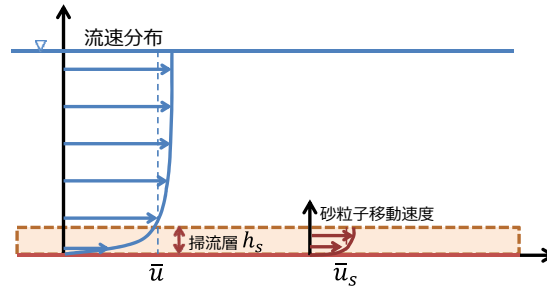


Fig. 5.2 掃流層

$$q_B = \int_0^{h_s} c_s u_s dz = \bar{c}_s \bar{h}_s \bar{u}_s \quad (5.2)$$

ここで、 h_s は掃流層厚、 c_s, \bar{c}_s は砂粒子の体積濃度その平均値、 u_s, \bar{u}_s は砂粒子の移動速度とその平均値を表す。断面平均場を考えると単位面積上の掃流層厚における全掃流粒子は掃流粒子数密度 ν_s を用いて $A_3 d^3 \nu_s$ と表され、Kalinske³⁾型の掃流砂量式の次式が導かれる。

$$q_B = A_3 d^3 \nu_s \bar{u}_s \quad (5.3)$$

従って、この式のパラメータで重要となるのは砂粒子の平均移動速度 \bar{u}_s と粒子数密度 ν_s となる。

芦田・道上⁴⁾は、Bagnold⁵⁾の粒子を含む流れの研究と同様に河床せん断力 τ は粒子の衝突によって生じるせん断力 $\tau_G (= \mu_k \sigma_G)$ と流体によるせん断力 τ_F からなっていると仮定し、平衡状態を前提とした場合には河床におけるせん断力が移動限界掃流力 τ_c に一致すると考え、

$$\tau_0 = \tau_G + \tau_c \quad (5.4)$$

としている。 τ_G は流砂重量の鉛直成分と粒子の動摩擦係数 μ_k との関係で次式が得られる。

$$\tau_G = \nu_s A_3 d^3 (\sigma - \rho) g \mu_k \quad (5.5)$$

ここで、 σ は砂の密度、 ρ は水の密度を表す。以上より砂粒子密度は、

$$\nu_s = \frac{1}{A_3 d^2 \mu_k} (\tau_* - \tau_{*c}) \quad (5.6)$$

と表される。ここで、 τ_*, τ_{*c} は無次元掃流力、無次元限界掃流力を表す。

砂粒子の平均移動速度については、砂粒子の平衡速度とし滑動形式の運動方程式より求め、

$$u_b - \bar{u}_s = \sqrt{\frac{4}{3} C_D \cdot \{(\sigma/\rho) - 1\} g d \mu_k} \quad (5.7)$$

となる。ここで、 C_D は抗力係数、 u_b は河床面から粒径オーダーの高さの流速を表す。 $\bar{u}_s = 0$ のとき、 u_b の値を砂の移動限界速度 u_c とすると、次式のように変形される。

$$\frac{\bar{u}_s}{u_b} = 1 - \frac{u_c}{u_b} \quad 1 - \frac{u_{*c}}{u_{*e}} \quad (5.8)$$

芦田・道上⁴⁾は $u_b = \beta u_{*e}$ (u_{*e} : 有効摩擦速度)として、式(5.6)と式(5.8)を Kalinske 型の掃流砂量式に代入し、

$$q_B = \frac{\beta}{(\sigma - \rho) g \mu_k} u_{*e} (\tau_* - \tau_{*c}) \left(1 - \frac{u_{*c}}{u_{*e}} \right) \quad (5.9)$$

そして、次式のように式を無次元量で表示し、パラメータを K に集約して次式を得ている。

$$q_{B*} = \frac{q_B}{\sqrt{\left(\frac{\sigma}{\rho} - 1\right) g d^3}} = K \tau_{*e}^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \quad (5.10)$$

式中のパラメータ K (=17)は、平坦河床の流速分布に対数側を適用して相当粗度高さにおける流速 u_b を求め、実験値と適合するようにチューニングされた値である。

上記した平衡掃流砂量式では、掃流砂量は無次元限界掃流力の関数であり、掃流砂量と無次元掃流力の間には1対1の関係が存在する。平衡状態では掃流砂量の場所的变化がなく、河床変化もないしない。実務において河床変動予測が試みられるとき、それらのほとんどが平衡流砂量式と土砂の連続式が用いられており、それらは水理量の平面的な違いと平衡流砂量式から求められる流砂量から非平衡性を生じさせ、河床変動を再現したに過ぎない。ある程度の流砂の非平衡性については、流れの非平衡性を考慮できれば平衡流砂量式で表現できているのである。河床変動の空間的スケールが砂粒の移動スケールより十分に大きい場合には、平衡流砂量式を用いても平衡状態を見る分には問題ないと思われる。しかし、すでに指摘されているように平衡流砂量式を用いた解析では本来の「流砂の非平衡性」の影響を明確な形で考慮したことにはなっていないため、流れの非平衡性が強い場合には、流砂量はその地点の局所的な掃流力のみ関数とはならず、平衡流砂量式に依拠した解析には限界があると考えられている。

次に、これまでに流砂の非平衡性に着目し提案された非平衡掃流砂量式および非平衡流砂モデルについて記述する。

▼5.2.2 流砂の非平衡性を考慮した流砂量式およびモデル

a) 中川・辻本の非平衡流砂量式

中川・辻本⁶⁾は, Einstein 型の流砂の確率モデルを基に, 砂粒子の離脱確率密度 (pick-up rate) と河床離脱から停止までの移動距離 (step length) で構成される非平衡流砂量式を提案している。

$$q_B(x) = \frac{A_3 d}{A_2} \int_0^\infty p_s(x-\xi) \int_\xi^\infty f_x(\lambda) d\lambda d\xi \quad (5.11)$$

ここで, $q_B(x)$ は地点 x の掃流砂量, A_2 , A_3 は 2 次元及び 3 次元の砂粒子形状係数 ($=\pi/4, \pi/6$), d は砂の粒径, p_s は pick-up rate, $f_x(\lambda)$ は step length の確率密度関数である。この式は地点 x の掃流砂量は, 地点 $(x-\xi)$ から pick-up された $p_s(x-\xi)$ のうち地点 x を越えるものは $\int_\xi^\infty f_x(\lambda) d\lambda$ となることを意味している。上流側の流砂状態が step length が分布を有することにより緩和されて下流へ伝播していくという非平衡流砂過程の基本特性がこの式に含まれている。

b) 福岡らの非平衡流砂量式

福岡・山坂⁷⁾は, 砂粒子が単位距離流下する間の流砂量変化が, 平衡流砂量と実際流れている流砂量の差に比例すると仮定して次式を提案している。

$$\frac{dq_B}{dx} = \kappa_B (q_{Be} - q_B(x)) \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \cos \gamma \frac{\partial q_{Bx}}{\partial x} + \sin \gamma \frac{\partial q_{Bx}}{\partial y} &= \kappa_B (q_{Bex} - q_{Bx}) + \frac{\tau_c}{\rho u_d} (\cos \gamma_e - \cos \gamma) \\ \cos \gamma \frac{\partial q_{By}}{\partial x} + \sin \gamma \frac{\partial q_{By}}{\partial y} &= \kappa_B (q_{Bey} - q_{By}) + \frac{\tau_c}{\rho u_d} (\cos \gamma_e - \cos \gamma) \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\kappa_B = 5 \times 10^{-6} \left[\left(\frac{\rho v^2}{(\rho_s - \rho)g} \right)^{1/3} \tau_* \right]^{-1} \quad (5.14)$$

ここで, $\cos \gamma, \sin \gamma$ は単位流砂量ベクトル, q_{Bx}, q_{By} は流砂量, κ_B は [1/長さ] の次元をもつ砂粒子平均 Step length の逆数に相当する非平衡パラメータ, $\tau_c = \tau_{*c}(\rho_s - \rho)gd$ であり, 式中の下付 e は平衡状態のものを表す。式(5.13)の右辺第二項は平衡流砂量ベクトルと流砂量ベクトルの方向の違いを表しているが差は小さいとしてこの項を省略している場合が多い。この非平衡流砂量式を用いたモデルは, 平衡流砂量式を緩和させたものであるため, 砂粒の移動する時間を無視する移動速度無限大モデルに区分される。また, 非平衡パラメータ κ_B を

どのように決めたらよいかに課題が残されている。

c) 長田らの砂粒移動経路を解く非平衡流砂モデル

長田ら⁸⁾は流砂の非平衡性を考慮した汎用性のあるモデルの構築とその適用および検証を行ってきている。砂粒の運動方程式を解くことにより、砂粒の移動経路をより正確に計算し、離脱と堆積に関するモデルを組み合わせて流砂の非平衡性を考慮した河床変動解析モデルのフレームワークを構築している。運動方程式には、抗力、重力、摩擦力の砂粒への作用力を考慮し、滑動形式で砂粒の動きを代表させている。

本研究では、水制周辺の局所勾配と河床近傍流れの空間的な変化が大きく、そして河床近傍流れの方向と砂粒の移動方向が異なることに配慮し、長田らの非平衡流砂モデルのフレームワークを混合砂へと拡張した非構造格子系の計算プログラムの構築を行った。長田らの非平衡流砂モデルと本研究の計算モデルの詳細については、次節で述べる。

d) Lagrange 型の砂粒子運動解析モデル

砂粒子の運動を正確に捉えるためには Lagrange 型の数値モデルが有効であることは、砂粒一粒一粒の運動の複雑さから考えると明瞭で、関根^{9) 10) 11) 12)}は基本的な力学法則に則った一粒一粒の砂粒子運動を個別に解析することによって掃流砂をシミュレーションする跳躍モデル (Saltation Model) の開発を行っている。関根はその Saltation Model より解析された結果を用いて、Step-length と摩擦速度と沈降速度の比 (u_* / w_0) の関係を導き出し、そして河床波の形成過程にシミュレーションモデルを適用^{11) 12)}し、実験を良好に再現した結果を得ている。なお、この方法では流砂の非平衡性の影響を力学的に陽に反映されたことになる。

また、後藤ら^{13) 14) 15) 16)}は多粒子間の相互干渉のモデル化に重きを置き、個別要素法 (Discrete Element Method: DEM) を用いた多数の粒状体モデルの運動を解析することによってシートフロー状漂砂や平坦河床上の掃流層の saltation 粒子、移動床上の saltation 粒子の解析が行われている。また、混合粒径の流砂へ解析モデルが拡張され、小粒径粒子の粒子間隙への潜り込みによる河床表層の鉛直分級現象に関する計算も行われている。近年では笠原ら¹⁷⁾は後藤らと同様の手法に加え、安息角の再現性を良くするための粒子の回転を拘束する効果を加え、鉛直二次元の Dune の発生過程の試験的なシミュレーションを行っている。

関根らの研究は別として、個別要素法を用いた手法では、粒子間をバネやダッシュポット、スライダックなどで粒子間を結ぶことで粒子の相互干渉をモデル化しているため、砂粒輸送の本質に関わる部分がパラメータによって支配されてしまう可能性がある。一般に粒子間接触をモデル化するためには少なくとも5つのパラメータ (法線方向および接線方向のバネ定数と粘性定数、接触面の摩擦係数) が必要とされ、これに加えて塑性バネの導入に伴うバネの圧縮限界、粒子間の異常反発の抑制のための反発係数の多くの定数がある。これらのパラメータの決定には、従来の研究の経験的な情報の蓄積により試行錯誤的な決め方などによるチューニングが必要となっている。そのため、この手法を積極的に導入することが必ずしも砂粒運動の本質的な現象解明に関する研究においては望ましいとは言い切れない。また、そ

これらの解析によるアプローチでは砂粒の離脱から堆積までを Lagrange 的に追跡する必要があるため、対象場の全ての砂粒子を解析する必要があるために計算機負荷が非常に大きく、現状では解析できる範囲が限られていることは否めない。本研究の水制周辺の3次元領域の砂粒子運動を捉えることや、本研究の目的である粒度変化を計算するためには混合粒径の計算をする必要があることと、本研究の実験でさえ現象を再現するためには数時間程度の計算が必要にあるため、現段階では本研究で適用する計算法として有効な選択とは言えない。

5.3 3次元流れと流砂の非平衡性を考慮した河床変動モデル

以下には本研究の数値解析モデルの3次元流れモデルと非平衡流砂モデルの詳細について記述する。

▼5.3.1 3次元流れの計算手法

本研究の3次元流れ解析モデルの基礎式は、Reynolds 平均された3次元の連続式、運動方程式、 $k-\varepsilon$ 方程式である。基礎式をテンソル表記におけるアインシュタインの総和規約で記述したものを次に示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (5.16)$$

ここで、 u_i ($i=1,2,3$) は平均流速成分、 x_i はデカルト座標 (x, y, z) 成分、 ρ は水の密度、 f_i は体積力、 p は圧力、 ν は動粘性係数、 τ_{ij} はレイノルズ応力 (Reynolds stress) である。

渦粘性モデルでは、乱流渦によって発生する応力を分子粘性応力と似た形で表現することが自然であるとし、レイノルズ応力を粘性係数と速度勾配の積 (渦粘性仮説) で表現している。標準 $k-\varepsilon$ モデルでは、レイノルズ応力テンソルと平均歪み速度テンソルの間に線形関係を仮定した次の方程式で表される。

(線形渦粘性モデル (LEVIM: Linear Eddy-Viscosity Model))

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \left(2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) \quad (5.17)$$

ここで、 k は乱流運動エネルギー、 ν_t は渦動粘性係数、 S_{ij} は平均歪み速度テンソル、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。

渦動粘性係数 ν_t は流れの変動成分 u' と密接に関係していることから（速度）×（長さ）であることを考慮し、乱流エネルギー k とエネルギー散逸率 ε を用いると、次元解析的に次式の形となる。

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5.18)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5.19)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } i = j \\ 0 & \text{if } i \neq j \end{cases} \quad (5.20)$$

ここで、 C_μ は無次元モデル定数で標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは一定と仮定されている。

次に乱流エネルギー k とエネルギー散逸率 ε の輸送方程式を示す。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (5.21)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + (\sigma_{1\varepsilon} P_k - \sigma_{2\varepsilon} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (5.22)$$

乱流エネルギーの生成項 P_k は次式より求められる。

$$P_k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (5.23)$$

最適化された標準的な5つの定数群は次の表の通りである。

Table 5.1 標準的な $k-\varepsilon$ モデルの定数群

C_μ	σ_k	σ_ε	$\sigma_{1\varepsilon}$	$\sigma_{2\varepsilon}$
0.09	1.0	1.3	1.44	1.92

（非線形 $k-\varepsilon$ モデルの適用）

標準型の線形 $k-\varepsilon$ モデルは多くの流れ場に適用され、比較的単純な流れ場においては多大な成果を上げている。しかし、複雑な流れ場では、乱れの非等方性を再現できないことや、流れの衝突部では乱れエネルギーが過剰に生成されること、また水路断面内に発生する第二種の渦を再現できないという成果が得られており、種々の改良が試みられている。そして、 $k-\varepsilon$ モデルの枠組み中でこの欠点を解決する方法として、非線形 $k-\varepsilon$ モデルが提案されている。非線形 $k-\varepsilon$ モデルは、渦動粘性係数の非等方性をモデル化しているとも考えられ、非等方 $k-\varepsilon$ モデルとも呼ばれている。

非線形 $k-\varepsilon$ モデルでは Yoshizawa¹⁸⁾の表現によるとレイノルズ応力テンソルは次のように表される。

$$\overline{u'_i u'_j} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t S_{ij} + Hot_{ij}^{quad} \quad (5.24)$$

ここで, Hot_{ij}^{quad} は2次の非線形項を表す.

$$Hot_{ij}^{quad} = \frac{\nu_t k}{\varepsilon} \sum_{\beta=1}^3 C_{\beta} \left(S_{\beta ij} - \frac{1}{3} S_{\beta \alpha \alpha} \delta_{ij} \right) \quad (5.25)$$

$$S_{1ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \quad (5.26)$$

$$S_{2ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_r} + \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_r} \right) \quad (5.27)$$

$$S_{3ij} = \frac{\partial u_r}{\partial x_i} \frac{\partial u_r}{\partial x_j} \quad (5.28)$$

(渦粘性係数の関数)

式(5.18)の渦粘性係数式中の C_{μ} については, 標準型 $k-\varepsilon$ モデルでは定数 (=0.09) とされており, これが線形の渦粘性モデルで満足な結果が得られない一つの要因であると考えられ, Craft・Suga¹⁹⁾ は歪速度の時間スケールが小さくなるような場では渦粘性係数と乱流エネルギーが減衰するという現象をストレイン・パラメータとローテーション・パラメータを用いてモデル化することを提案した. そして, ストレイン・パラメータとローテーション・パラメータを導入した C_{μ} のモデル化は現在いくつか提案されている (Table 5.2, Fig. 5.3).

ここで $S_{k\varepsilon}$ はストレイン・パラメータ, Ω はローテンション・パラメータで次式により定義される.

$$S_{k\varepsilon} \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}} \quad (5.29)$$

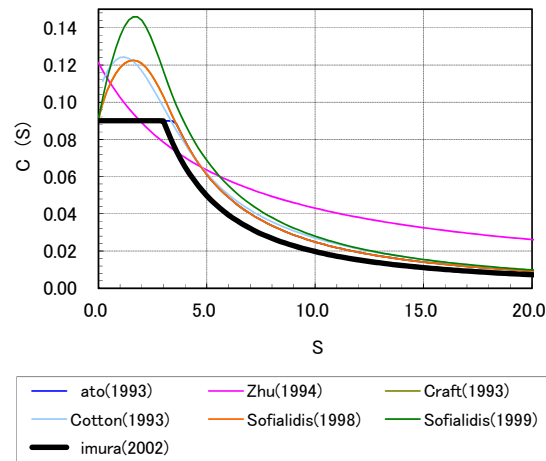
$$\Omega \equiv \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega_{ij} \Omega_{ij}} \quad (5.30)$$

Table 5.2 提案されている C_{μ} の関数形

Craft et al.(1993) ¹⁹⁾	$C_{\mu} = \frac{0.3}{1 + 0.35(\max[S_{k\varepsilon}, \Omega])^{1.5}} \left[1 - \exp \left\{ - \frac{0.36}{\exp(-0.75 \max(S_{k\varepsilon}, \Omega))} \right\} \right]$
Cotton et al.(1993) ²⁰⁾	$C_{\mu} = 0.09 \cdot \left(\frac{3.89}{S_{k\varepsilon}} - 0.089 \right) \left[1 - \exp \left\{ - \left[0.3 S_{k\varepsilon} + 0.15 S_{k\varepsilon}^2 \right] \right\} \right]$
Kato et al.(1993) ²¹⁾	$C_{\mu} = \min \left[0.09, \frac{0.3}{1 + 0.35(\min[20, S_{k\varepsilon}])^{1.5}} \right]$

Table 5.2 (continued.)

Zhu et. al.(1994) ²²⁾	$C_\mu = \frac{2/3}{5.5 + S_{k\varepsilon}}$
Sofialidis et.al.(1999) ²³⁾	$C_\mu = \frac{0.3}{1 + 0.35(\max[S_{k\varepsilon}, \Omega])^{1.5}} \left[1 - \exp\left\{ -\frac{0.36}{\exp(-0.75 \max(S_{k\varepsilon}, \Omega))} \right\} \right] \cdot \left\{ 1 - \exp\left[\frac{-15}{(\max(S_{k\varepsilon}, \Omega))^{0.6} + 0.01} \right] \right\}$
木村・細田 (1999) ²⁴⁾	$C_\mu = \min \left[0.09, \frac{0.3}{1 + 0.09(\max(S_{k\varepsilon}, \Omega))^2} \right]$

Fig. 5.3 $C_\mu(S)$ の関数形

本研究では、木村・細田²⁴⁾によって提案されている次の関数形および Table 5.3 に示すモデル定数を用いた。

$$C_\mu = \min \left[0.09, \frac{0.3}{1 + 0.09M^2} \right] \quad (5.31)$$

$$M = \max(S_{k\varepsilon}, \Omega) \quad (5.32)$$

Table 5.3 非線形 k- ε モデルにおけるモデル定数群

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
$0.4f_M(M)$	0.0	$-0.13f_M(M)$	$-0.02f_M(M)$	0.0

$$f_M(M) = \frac{1.0}{1 + 0.01M^{2.0}} \quad (5.33)$$

有限体積法（FVM : Finite Volume Method）

本研究の3次元流れの計算モデルは、有限体積法を採用している。有限体積法では、計算領域を格子によって小さなコントロールボリューム(Control Volume: 以下 CV と略記)に分割し、次のような一般化した保存方程式の積分形式を用いている。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V dV + \int_S \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dV + \int_S \phi \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V b dV \quad (5.35)$$

式(5.34)は連続式、式(5.35)は運動量などの移流拡散方程式を示す。ここで、 V は CV の体積、 S は外側向き単位ベクトル \mathbf{n} を持つ CV の表面積、 ϕ はスカラーまたはベクトル構成要素の量、 \mathbf{u} は流速ベクトル (u, v, w)、 Γ は拡散係数、 b は ϕ の生成項を表す。

（非構造格子）

本研究の計算モデルは格子系として非構造格子を採用している。非構造格子は、三角形、四角形の面を有した六面体や五面体などを混在して計算格子を構成することが可能で、自由度が大きく複雑な地形を扱う場合に有利である。また、計算領域内において格子の粗密にも柔軟に対応でき、構造格子のように部分的に格子を細分化することで全格子数が膨大に増加するようなこともないため、計算格子の優位性は高い。一方、非構造格子は格子の並びに制約がないことで大きな利便性を持っているが、プログラム実行時に格子の連結情報をメモリへ記憶する必要があるため、構造格子に比べて計算メモリスペースを多く占有してしまうことになる。Fig. 5.4 には、基本的に用いる六面体および三角柱を示し、四面体、五面体は特殊な場合に用いる。

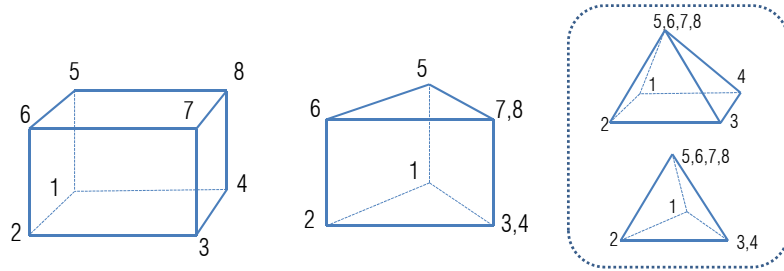


Fig. 5.4 多面体コントロールボリュームとその節点

（空間的な離散化）

方程式は次のように離散化される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dV + \sum_f \phi_f (\mathbf{u}_{f\perp} \cdot \mathbf{S}_f) = \sum_f \Gamma_f \left. \frac{\partial \phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_f \cdot \mathbf{S}_f + b_P - s_P \phi_P \quad (5.36)$$

ここで、 $\mathbf{u}_{f\perp}$ は面に垂直な流速成分、 \mathbf{S} は $\mathbf{n} dS$ (\mathbf{n} : 外側向き単位ベクトル、 S : 表面積) を

表し, b_p は未知変数を除く全ての生成項, $-s_p\phi_p$ は implicit に扱う未知量を含む生成項を示す。そして, 下付き p は現在の CV(the present CV)を表し, 下付き f は CV の面番号を表す変数, 下付き \perp は面に垂直な変数成分であることを表す。

計算変数の CV 表面の値 ϕ_f については, 次式を用いて補間して求める。

$$\phi_f = \alpha_f \phi_p + (1 - \alpha_f) \phi_A \quad (5.37)$$

ここで,

$$\alpha_f = \frac{d_{Af}}{d_{Af} + d_{AP}} \quad (5.38)$$

ここで, 下付き A は隣接した CV(adjacent CV)の値であることを表し, d_{fp}, d_{fA} は CV 表面から各 CV 中心までの距離を表す。

空間差分については, Power law スキームを使用し, 式(5.36)は次式になる。

$$\sum_f \{ [D_f A(P_f)] + \max(-F_f, 0) (\phi_p - \phi_A) + F_f \phi_p \} = b_p - s_p \phi_p \quad (5.39)$$

ここで, F_f, D_f はそれぞれ移流および拡散の大きさ, P_f はその両者の比を示し, 次式より求められる。

$$F_f = u_{f\perp} S_f, \quad D_f = \frac{\Gamma_f S_f}{d_{AP}}, \quad P_f = \frac{F_f}{D_f} \quad (5.40)$$

$$A(P_f) = \max[0, (1 - 0.1|P_f|)^5] \quad (5.41)$$

拡散係数の CV 面上への補間は注意が必要であり, 壁境界近傍で物理的な妥当性を確保するために, 拡散係数の補間には次式の調和平均を行う。

$$\Gamma_f = \frac{\Gamma_A \Gamma_p}{\alpha_f \Gamma_p + (1 - \alpha_f) \Gamma_A} \quad (5.42)$$

表面フラックス計算時に行う CV 面への補間において, 単純な算術平均を用いる場合には解が市松模様(checkerboard)の様な不連続な分布になる可能性があるため, コロケート格子の使用が控えられてきたが, Rhie・Chow²⁵⁾によって提案された圧力勾配を考慮した項の導入した補間方法によって改善された。

着目する CV の未知量は, 離散化によりその隣接した CV の値によって最終的に表され, x 方向の u の運動方程式を例として次に示す。

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} \Big|_p - \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_p + b_p \quad (5.43)$$

$$a_A u_A = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} \Big|_A - \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_A + b_A \quad (5.44)$$

ここで, a は CV 中央の未知変数のための係数, nb は隣接の CV を表す。

有限体積法式系の保存性の原則から、2つの隣接したCVの共通面における流速もまた、式(5.43)、式(5.44)の離散化された運動方程式と相似形となる。

$$a_f u_f = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} \Big|_f - \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_f + b_f \quad (5.45)$$

式(5.45)による u_f の計算において、式(5.43)と式(5.44)と線形補間による簡略化で以下の方程式が得られる。

$$u_f = \overline{u_f} + \frac{1}{a_f} \left(\overline{\int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV} \Big|_f - \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_f \right) \quad (5.46)$$

ここに、

$$\overline{u_f} = a_f u_P + (1 - a_f) u_A \quad (5.47)$$

$$a_f = a_f a_P + (1 - a_f) a_A \quad (5.48)$$

$$\overline{\int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV} \Big|_f = a_f \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_P + (1 - a_f) \int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_A \quad (5.49)$$

$$\int_V \frac{\partial p}{\partial x} dV \Big|_f = S_{fx} (p_A - p_P) \quad (5.50)$$

ここで、 S_{fx} はx軸と直角をなすyz平面への投影面積を表す。この補間方法を用いることによって、解が市松模様になる現象が回避される。また、y方向、z方向の流速成分も同様に解く。

(時間の離散化)

上述した空間的な離散化により、以下の方程式が得られる。

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \phi dV = F \quad (5.51)$$

$$F = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_P - a_P \phi_P \quad (5.52)$$

そして、時間の離散化には、二次精度の陰的なクランク・ニコルソン法を用いる。

$$\frac{\phi_{m+1} - \phi_m}{\Delta t} = \frac{F_{m+1} + F_m}{2} \quad (5.53)$$

下付き m 、 $m+1$ は一つ前と現在の時間ステップを表し、最終的に次に示す代数方程式が得られる。

$$a_P \phi_P^{m+1} = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^{m+1} + b_P \quad (5.54)$$

$$\begin{aligned}
a_p^{m+1} &= \sum_{nb} a_{nb}^{m+1} + \sum_f F_f + s_p^{m+1} \\
a_p &= a_p^{m+1} + \frac{2V}{\Delta t} \\
b_p &= b_p^{m+1} + \frac{2V}{\Delta t} \phi_p^m + \left(\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b_p - a_p \phi_p \right)^m
\end{aligned} \tag{5.55}$$

(圧力と速度の連立解法)

運動方程式が、各方向の流速成分を求める役割であるのは明らかだが、運動方程式には、圧力の情報（圧力勾配）が含まれる。この圧力に対する独立した方程式がないことが、方程式系を解くことを難しくしている。この問題を解決する方法の1つとして、連続の式を満足するように圧力場を構築することである。本研究では、その圧力と流速の連立解法に広く使われている SIMPLE (Semi-implicit method for pressure-linked equations) 法を用いる。

この方法では、最初に圧力分布を仮定し、次に連続方程式で圧力場を修正することを行う。非構造格子での計算手順を以下にまとめる。

ここでは、連続方程式を満たしていない仮定された圧力分布と流速には添字(*)を付け、補正量は(') を付ける。そして、添字のない変数は補正後の値を表す。

$$\begin{aligned}
u_i &= u_i^* + u_i' \\
p &= p^* + p'
\end{aligned} \tag{5.56}$$

離散化された運動方程式で生成項から圧力項を取り出して表示すると、x 方向の流速成分 u^* は次式を満たす。

$$a_p u_p^* = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb}^* - \sum_f S_{fx} p_f^* + b_p \tag{5.57}$$

一方、補正された流速成分 u に基づく離散化された運動方程式は以下の通りである。

$$a_p u_p = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} - \sum_f S_{fx} p_f + b_p \tag{5.58}$$

式 (5.57) から式 (5.58) を差し引き、式 (5.56) を考慮すれば、 u のための補正量の次式が得られる。

$$u_p' = \frac{\sum_{nb} a_{nb} u_{nb}' - \sum_f S_{fx} p_f'}{a_p} \tag{5.59}$$

SIMPLE 法では、右辺第1項は省略されて、CV 中心の流速補正量 u' は圧力補正量 p' と単純な関係となる。

$$u'_p = -\frac{\sum S_{fx} p'_f}{a_p} \quad (5.60)$$

CV 面における流速の補正は、同様に、隣接した CV 中心の圧力補正量を用いて求められる。

$$u'_f = -\frac{1}{a_p} S_{fx} (p'_A - p'_P) \quad (5.61)$$

以上のように、他の速度成分補正も同様に行う。そして、補正された流速場は連続方程式を満足さなければならず、圧力補正の方程式は次のようになる。

$$\sum_f \left[(u_f^* S_{fx} + v_f^* S_{fy} + w_f^* S_{fz}) + \left(\frac{S_{fx}^2}{a_{px}} + \frac{S_{fy}^2}{a_{py}} + \frac{S_{fz}^2}{a_{pz}} \right) (p'_P - p'_A) \right] = 0 \quad (5.62)$$

a_{px}, a_{py}, a_{pz} はそれぞれ u, v, w の計算のための係数である。

$$a_p^p p'_P = \sum_{nb} a_{nb}^p p'_{nb} + b_p^p \quad (5.63)$$

ここで、

$$\begin{aligned} a_{nb}^p &= \frac{S_{fx}^2}{a_{px}} + \frac{S_{fy}^2}{a_{py}} + \frac{S_{fz}^2}{a_{pz}} \\ a_p^p &= \sum_{nb} a_{nb}^p \\ b_p^p &= -\sum_f (u_f^* S_{fx} + v_f^* S_{fy} + w_f^* S_{fz}) \end{aligned} \quad (5.64)$$

である。この方程式の解は、圧力補正量であるため、ここで速度の補正量が得られることになる。そして、流速場は式 (5.56) を用いて新しいものに置き換えられる。これらの過程を値が収束するまでこれを繰り返すことになる。

(境界条件)

流入境界：流入境界は、圧力以外は境界条件上の CV に値を直に与えるディリクレ条件(Dirichlet boundary condition)を課しており、流速に対数分布を仮定し、上流端から供給される流量が指定流入量と一致するようにしている。また、圧力については、ノイマン条件(Neumann boundary condition)で勾配ゼロと設定している。

流出境界：流出境界には、ノイマン条件を課し勾配ゼロと設定した。本研究では、定常流量の実験およびその解析を実施しているため、計算領域全体の水量を一定に保つ必要があり、以下の式より勾配ゼロより外挿して求めた境界値を補正することを行っている。

$$u_{fi} = u_{fi}^{old} \frac{\sum_{inlet} u_{f\perp} S_f}{\sum_{outlet} u_{f\perp} S_f} \quad (5.65)$$

ここで、 u_{fi} は流出境界の流速成分 ($i=1,2,3$) を示し、添字 *old* は勾配ゼロから求めた値を示す。

壁面境界：(壁関数：対数則)

壁面近傍では粘性の影響が強くなり（低レイノルズ数効果）、壁に沿った方向の乱れと比べて壁に垂直方向の乱れが抑制される非等方性効果が現れ、 $k-\varepsilon$ モデルをそのまま解いては精度が期待できない。この回避方法として壁関数を用いて簡略化して計算を行う方法と、改良された $k-\varepsilon$ モデルを用いる方法の2つが考えられる。本研究では河床変動を計算することが目的であり、後者の方法では壁近傍の計算メッシュを十分に密に配置する必要があることと河床形状が時々刻々と変化する複雑さがあるため、前者の壁関数を用いた計算方法を選択した。

壁面近傍の平均速度分布を表現する壁関数は、壁座標 z^+ 、無次元化速度 u^+ の関数であり、壁からの距離 z_{\perp} 、壁に沿う流速 $u_{//}$ はそれぞれ次のように定義される。

$$z^+ = \frac{u_* z_{\perp}}{\nu} \quad (5.66)$$

$$u^+ = \frac{u_{//}}{u_*} \quad (5.67)$$

本研究では、壁面から1つ目の CV で対数則が成立しているものとして以下の壁関数を適用する。

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E_r z^+) \quad (5.68)$$

ここで κ = カルマン定数 (=0.41)、 E_r = 壁面の粗度パラメータを表す。

壁面近傍でエネルギーの生成と散逸がつり合うという局所平衡を仮定すると、

$$k = \frac{u_*^2}{C_{\mu}^{1/2}} \quad (5.69)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z_{\perp}} \quad (5.70)$$

が得られる。壁面せん断応力ベクトルは、

$$\boldsymbol{\tau}_w = -\lambda_w \mathbf{V}_w \quad (5.71)$$

となる。ここで、 $\lambda_w = \rho C_{\mu}^{1/4} k^{1/2} / \ln(E_r z^+)$ 、 \mathbf{V}_w は壁面に接する CV の流速ベクトルを表す。

運動方程式において、壁面の流速をゼロと設定し、壁面 CV においては式(5.71)を用いて生成項を加える。また、壁面 CV の法線方向の k の微分はゼロと設定し生成項を次式より求める。

$$P_k = \frac{\tau_w}{\rho} \frac{\partial u_{//}}{\partial n} = \frac{\tau_w}{\rho} \frac{u_{//}}{z_{\perp}} \quad (5.72)$$

そして、壁面に接する CV の ε については直接次式で求める。

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z_\perp} = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z_\perp} \quad (5.73)$$

粗度パラメータは、Wu ら²⁶⁾が提案している粗度レイノルズ数 $k_s^+ = u_* k_s / \nu$ より次式で求められる。

$$E_r = \exp[\kappa(B_0 - \Delta B)] \quad (5.74)$$

$$\Delta B = \begin{cases} 0 & , (k_s^+ < 2.25) \\ [B_0 - 8.5 + 1/\kappa \ln k_s^+] \sin[0.4258(\ln k_s^+ - 0.811)] & , (2.25 \leq k_s^+ < 90) \\ B_0 - 8.5 + 1/\kappa \ln k_s^+ & , (k_s^+ \geq 90) \end{cases} \quad (5.75)$$

ここで、 k_s は相当粗度高さ、 B_0 は定数 ($= 5.2$)、 ΔB は k_s^+ より決まる粗度関数である。 k_s は河床の砂や河床波の影響を表す粗度パラメータで、滑らかな平坦河床においては $k_s = 0$ 、砂が敷かれた平坦河床においては van Rijn²⁷⁾が実験および現地データより $k_s = 3d_{90}$ を提案し、本研究においてもこれに準拠した。

(解法：不足緩和 under-relaxation)

陰解法は、陽解法よりも時間ステップに対する拘束条件が緩く、長い時間ステップを設定できるために、定常流や緩やかに変化する流れの計算では陰解法が好まれている。

各方程式の 1 つの変数を計算する際は、他の変数については、その時点で最後に更新された値を用いて解き、方程式を順に解きすべての方程式が満足するまで反復を繰り返す。不足緩和とは、反復計算のステップを進める際に、それぞれの変数の変化を制限することであり、Patankar²⁸⁾によって提案される広く使われている方法である。

最終的な代数方程式は、繰り返し計算ステップ n では次のように表示される。

$$a_P \phi_P^n = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n + b_P \quad (5.76)$$

方程式は線形化されて分離されるので、次の繰り返しステップのための式 (5.76) を直接用いれば、繰り返し計算中に不安定となることがある。そのため以下のように緩和係数が導入する。

$$\phi^n = \phi^{n-1} + \alpha_\phi (\phi - \phi^{n-1}) \quad (5.77)$$

ここで、 ϕ^n は現在のステップの値、 ϕ^{n-1} は前反復ステップの値、 ϕ は式 (5.76) による解、 α_ϕ は緩和係数である。式 (5.76) を式 (5.77) に代入すれば、式 (5.77) の ϕ は、

$$\phi = \frac{\sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n + b_P}{a_P} \quad (5.78)$$

となる。したがって、

$$\frac{a_P}{\alpha_\phi} \phi_P^n = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n + b_P + \frac{1 - \alpha_\phi}{\alpha_\phi} a_P \phi_P^{n-1} \quad (5.79)$$

となり、これを次のように表示する。

$$a_P^* \phi_P^n = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb}^n + b_P^* \quad (5.80)$$

ここで、

$$a_P^* = \frac{a_P}{\alpha_\phi} \quad (5.81)$$

$$b_P^* = b_P + \frac{1 - \alpha_\phi}{\alpha_\phi} a_P \phi_P^{n-1} \quad (5.82)$$

(流れの計算手順)

流れ計算の手順を以下にまとめる。

すべての変数に $t = t_0$ の初期値を割り当て、計算を開始する。

- f-1) 流速の (u, v, w) 各方向成分について順に運動方程式を解く。その際、他の流速成分、圧力、渦動粘性係数、乱流運動エネルギー、逸散率は既知とみなし、収束計算を行う。
- f-2) 得られた流速場は、CV 面を通過するフラックスを計算するのに用い、圧力補正方程式を解いて、流速場を補正する。
- f-3) 輸送方程式を解いて乱流運動エネルギー、逸散率を計算する。渦動粘性係数を更新する。

上記の手順は、外部収束計算と呼ばれ、残差が十分に小さくなり収束状態に達したと判断されるか、もしくは、定められた最大繰り返し回数に達するまで f-1)～f-3) の手順を繰り返す。反復計算終了後、得られた結果を新しい時間ステップの初期値として更新し、次のステップの f-1)～f-3) の反復計算へと進む。

▼5.3.2 非平衡流砂モデルによる河床変動計算手法

水制工周辺の局所洗掘現象においては、流砂の非平衡現象が卓越し、平衡流砂量式による評価では妥当性を欠くと考えられる。そこで本研究では、長田ら⁸⁾によって構築されている砂粒の運動方程式を解く非平衡流砂モデルに倣って河床変動モデルの構築を行った。本研究の解析モデルは、長田らのモデルと異なり複雑な形状に適用可能な非構造メッシュを採用し、そして流砂の計算には粒径別に計算を行う混合砂礫モデルであることが主に異なっている点である。

本研究のモデルでは、各計算メッシュにおいて各粒径階の pick-up 量を計算し、その河床から離脱した各代表砂粒について砂粒の運動方程式を計算することによって移動経路を計算し、その移動経路上に土砂を堆積させ、河床表層の粒度分布を変化させている。詳細について、次に記述する。

a) pick-up 量の計算

粒径階 k ，メッシュ番号 i からの単位時間あたり離脱土砂量は pick-up rate p_s を用いて次式のように表せる。

$$V_{p(i,k)} = \frac{A_3 d_{(k)}}{A_2} p_{s(i,k)} S_{p(i)} p_{b(i,k)} \quad (5.83)$$

ここで、 $d_{(k)}$ は粒径階 k の河床材料粒径、 A_2, A_3 は砂粒の 2 次元、3 次元の形状係数 ($=\pi/4, \pi/6$)、 $S_{p(i)}$ は離脱地点メッシュの鉛直方向射影面積、 $p_{b(i,k)}$ は河床交換層の粒径階 k の含有率である。

pick-up rate は局所勾配の影響を考慮した中川・辻本・村上²⁹⁾による次式より計算する。

(中川・辻本・村上の pick-up rate 式)

$$p_{s(k)} \sqrt{\frac{d_{(k)}}{(\sigma/\rho - 1)g}} = F_0 G_* \tau_{*k} \left(1 - \frac{k_p \phi_b \tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right)^{m_p} \quad (5.84)$$

$$G_* = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (5.85)$$

$$\phi_b = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha}{\cos \psi + k_L \mu_s} \frac{1 + k_L \mu_s}{\mu_s} \quad (5.86)$$

ここで、 τ_{*k}, τ_{*ck} は粒径階 k の無次元掃流力と無次元限界掃流力、 σ は河床材料の密度 ($\sigma/\rho = 2.65$)、 g は重力加速度、 θ_b は河床最大傾斜方向の勾配角、 k_L は抗力と揚力の比 ($=0.85$)、 μ_s は砂の静止摩擦係数 ($=0.7$)、 G_* と ϕ_b は砂粒の移動方向と流れ方向そして河床局所勾配の方向ベクトルの影響を考慮したパラメータであり、 ψ は河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度、 α は砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度である。

定数については、中川ら²⁹⁾と同様に $F_0 = 0.03, k_p = 0.7, m_p = 3$ を用いた。なお、pick-up rate 計算は、河床計算メッシュの中央地点で行う。そして、無次元掃流力、無次元限界掃流力については、次の岩垣式¹⁾より平均粒径に対する限界摩擦速度を求め、その値を用いて芦田・道上³¹⁾により修正された Egiazaroff の式³²⁾より各粒径階の限界摩擦速度および無次元限界掃流力を求めた。

(Egiazaroff の式)

$$\begin{cases} \frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = \frac{1.64}{(\log_{10} 19d_{(k)}/d_m)^2} \times \frac{d_{(k)}}{d_m} & d_{(k)}/d_m \geq 0.4 \\ \frac{u_{*ck}^2}{u_{*cm}^2} = 0.85 & d_{(k)}/d_m < 0.4 \end{cases} \quad (5.87)$$

(岩垣の式)

$$\begin{aligned} d &\geq 0.303 \text{ cm} & ; & \quad u_{*c}^2 = \tau_c / \rho = 80.9d \\ 0.118 \leq d &\leq 0.303 \text{ cm} & ; & \quad = 134.6d^{31/22} \\ 0.0565 \leq d &\leq 0.118 \text{ cm} & ; & \quad = 55.0d \\ 0.0065 \leq d &\leq 0.0565 \text{ cm} & ; & \quad = 8.41d^{11/32} \\ d &\leq 0.0065 \text{ cm} & ; & \quad = 226d \end{aligned} \quad (5.88)$$

この二つの式によって混合粒径を構成する粒径階毎に限界掃流力が異なって計算される。細かい粒子で構成されている河床で突出した大きな粒子が移動しやすくなり、粗い粒子で構成された河床で隙間を埋めるように細かい粒子が存在する場合には細かい粒子が移動し難くなるような、遮蔽効果がこの式で組み込まれる。

b) deposition 量の計算

後述する運動方程式より計算される砂粒の移動地点における土砂堆積量を step length の確率密度関数と砂粒の移動距離、そして a) で求めた pick-up 量を用いて求める。計算メッシュ i から出発した砂粒の移動経路において、離脱から m' ステップ後の位置における単位時間あたりの deposition 量 $V_{d(i,k,m')}$ は次式で表される。

$$V_{d(i,k,m')} = V_{p(i,k)} f_s(s_{(i,k,m')}) \Delta s \quad (5.89)$$

ここで、 $V_{p(i,k)}$ は計算メッシュ番号 i の粒径階 k の pick-up 量、 $f_s(s_{(i,k,m')})$ は step length の確率密度関数を表し、 $s_{(i,k,m')}$ は計算メッシュ i から離脱した粒径階 k の砂粒の移動距離、 Δs は 1 ステップの砂粒移動距離である。

step length の確率密度関数は、次式のような指数関数を用いる。

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda_{(k)}} \exp\left(-\frac{S_{(i,k,m')}}{\lambda_{(k)}}\right) \quad (5.90)$$

ここで、 $\lambda_{(k)}$ は粒径階 k の砂粒の平均 step length である。本研究では、平均 step length については Sekine・Kikkawa³³⁾ が提案した近似式を用いた。

$$\lambda_{(k)} = \alpha_2 \left(\frac{u_*}{w_0} \right)^{3/2} \cdot \left[1 - \frac{(u_{*c}/w_0)}{u_*/w_0} \right] \quad (5.91)$$

ここで、 $\alpha_2 = 3.0 \times 10^3$ 、 w_0 は砂粒の沈降速度を示す。これは Saltation モデルのシミュレーションにより計算した step length より作成した step length の近似式である。Fig. 5.5 には Saltation モデルにより計算された step length と近似式の適合性、そしてその他の実験より計測した step length とその近似式の適合性を示しており、よく一致していることが確認できる。ただし、これらの実験や Saltation モデルの計算は、平坦河床を対象としており、本研究の水制周辺の洗掘河床の step length がこの近似式によって再現できるかどうかには疑問が残されている。辻本・水上³⁴⁾が指摘しているように水制周辺で発生する渦によって step length は近似式で算定される値より大きい可能性がある。従って、この水制等の構造物周辺の step length については、さらなるデータの蓄積が必要で step length のモデル化についても今後の課題として残される。

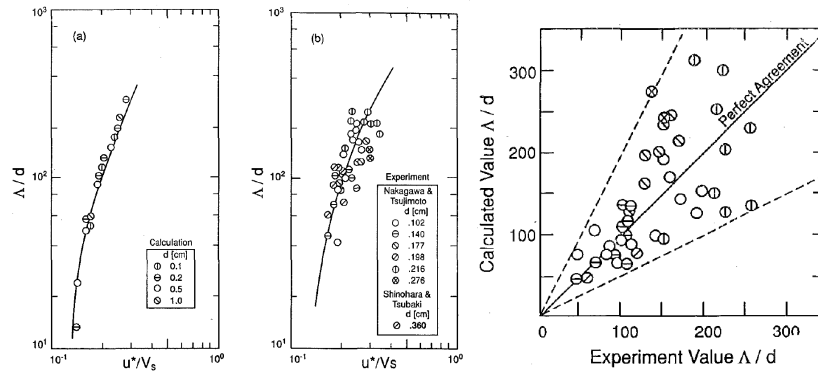


Fig. 5.5 Step length と近似式の適合性³³⁾

なお、平均 step length の近似式(5.91)内の沈降速度については、Rubey の式³⁵⁾より求めた。

式(5.89)より求めた堆積量については、移動経路を計算した砂粒がその時点で含まれているメッシュとその近傍メッシュへ配分して堆積させている。その際、砂粒位置と堆積させるメッシュ中心との距離をその計算メッシュ面積の平方根で無次元化して、無次元化した距離の逆数に応じた重み付きで近傍メッシュに配分を行っている。

c) 滑動形式の運動方程式を用いた砂粒の移動経路計算

離脱砂粒の移動経路を、砂粒の滑動形式の運動方程式を用いて計算する。当該領域に存在する砂粒を全て解くのは計算機負荷、記憶容量から考えて現状では困難である。そのため、以下に述べる計算は、あるタイミングに離脱する砂粒の移動経路計算を、各メッシュにおいて粒径階別に1つの砂粒に代表させている。すなわち、各メッシュで離脱する粒径階の砂粒分の運動方程式を解くことになる。

まず、河床平面を表すために $x-z$ 平面、 $y-z$ 平面内の河床平面と平行な単位ベクトルを、それぞれ $\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$ とする。砂粒に作用する力として、抗力、摩擦力、重力、浮力、揚力を考えると、 \mathbf{p}_{bj} ($j=1,2$) 方向についての粒径階 k の砂粒の運動方程式は以下のようになる。

$$m_{sed(k)} \frac{du_{sed(j,k)}}{dt} = D_{(j,k)} + W_{(j,k)} - F_{(j,k)} \quad (j=1,2) \quad (5.92)$$

ここで、 m_{sed} は砂粒の仮想質量であり、付加質量係数は長田ら⁸⁾と同様に $C_m (=0.5)$ を用いて、次式で表せる。

$$m_{sed(k)} = \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_m \right) A_3 d_{(k)}^3 \quad (5.93)$$

$D_{(j,k)}, F_{(j,k)}, W_{(j,k)}$ は、砂粒に作用する抗力、摩擦力の \mathbf{p}_{bj} 方向成分、水中重力であり、粒径階 k の砂粒に作用するそれぞれの大きさを D, F, W とすれば、次のように表せる。

$$D_{(k)} = \frac{1}{2} C_D \rho (u_{bj} - u_{sed(j,k)})^2 c_e A_2 d_{(k)}^2 \quad (5.94)$$

$$D_{(1,k)} = D_{(k)} \frac{u_{b1} - u_{sed(1,k)}}{\sqrt{(u_{bj} - u_{sed(j,k)})^2}} \quad (5.95)$$

$$D_{(2,k)} = D_{(k)} \frac{u_{b2} - u_{sed(2,k)}}{\sqrt{(u_{bj} - u_{sed(j,k)})^2}} \quad (5.96)$$

$$F_{(k)} = \mu_k \left(W_{(k)} \frac{\cos \theta_{bx} \cos \theta_{by}}{\sin \theta_p} - k_L D_{(k)} \right) \quad (5.97)$$

$$F_{(1,k)} = F_{(k)} \frac{u_{sed(1,k)}}{\sqrt{(u_{sed(j,k)})^2}} \quad (5.98)$$

$$F_{(2,k)} = F_{(k)} \frac{u_{sed(2,k)}}{\sqrt{(u_{sed(j,k)})^2}} \quad (5.99)$$

$$W_{(k)} = (\sigma - \rho)gA_3d_{(k)}^3 \quad (5.100)$$

$$W_{(1,k)} = -W_{(k)} \frac{\sin \theta_{b1} \cos^2 \theta_{b2}}{\sin^2 \theta_p} \quad (5.101)$$

$$W_{(2,k)} = -W_{(k)} \frac{\sin \theta_{b2} \cos^2 \theta_{b1}}{\sin^2 \theta_p} \quad (5.102)$$

ここで、 $u_{sed(j,k)}$ は粒径階 k の砂粒移動速度の \mathbf{p}_{bj} 方向成分、 u_{bj} は底面近傍の流速 \mathbf{p}_{bj} 方向成分、 C_D は抗力係数 (= 0.4)、 c_e は砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数、 μ_k は砂粒の動摩擦係数 (= 0.35)、 θ_{bx}, θ_{by} は x, y 方向の河床勾配角、 θ_p は \mathbf{p}_{b1} と \mathbf{p}_{b2} のなす角度である。 c_e は遮蔽係数に相当するもので、ここでは簡単のため、静止砂粒に対しては 0.4、移動中の砂粒に対しては 1.0 を用いた。

砂粒位置は、砂粒の移動速度ベクトルにより次式のように表される。

$$\mathbf{p}_{sed(m',k)} = \mathbf{p}_{sed(m'-1,k)} + \mathbf{u}_{sed(k)} \Delta t_s \quad (5.103)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{sed(n,k)}$ は粒径階 k の砂粒が pick-up 後の m' ステップ目の位置ベクトルである。そして、deposition 量を求める際の step length の確率密度関数式(5.90)で必要な砂粒の移動距離は次式で求められる。

$$S_{(i,k,m')} = \sum \Delta t_s |\mathbf{u}_{sed(m')}| \quad (5.104)$$

d) 河床変動量の計算

上述した方法によって算出した pick-up 量、deposition 量を用いて、各メッシュの河床変動量の計算を行う。pick-up 量の計算については、メッシュ中心で定義しているが、deposition 量については、その各砂粒の移動経路上で移動距離に応じて毎ステップ計算されているため、堆積させる際に河床高定義点への換算を行う必要がある。本解析モデルでは移動経路を計算した砂粒がその時点で含まれているメッシュと砂粒移動方向に隣接するメッシュへ配分して堆積させている。もし移動砂粒が含まれるメッシュのみに堆積させた場合、pick-up 量が少なく、そして step length が小さい場合には、計算メッシュの大きさによっては離脱したメッシュから出る前に全て堆積してしまう可能性があり、その場合は少しも河床変動していない結果となる。砂粒移動方向に隣接するメッシュへも堆積量を配分した意図は主にそこにある。その際、砂粒位置と堆積させるメッシュ中心との距離をその計算メッシュ面積の平方根で無次元化し、無次元化した距離の逆数に応じた重み付きで近傍メッシュに配分を行っている。

以下に、河床変動量の計算の流れを示す。

- (1) メッシュ i から離脱した粒径階 k の m' ステップの砂粒位置，そしてその砂粒が含まれるメッシュとその近傍メッシュを探索し記憶しておく。
- (2) 各砂粒の移動距離より deposition 量 $V_{d(i,k,m')}$ を計算し，砂粒が含まれるメッシュとその近傍メッシュへ堆積量を配分する。
- (3) 各計算メッシュにおいて，移動している全ての砂粒から計算領域内の土砂堆積配分量を粒径階毎に合計する。
- (4) 各メッシュの堆積量を用いて次式よりその計算ステップの河床変動量を計算する。

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{A_1 A_2}{A_3} \frac{\sum_k V_{d(k)} - \sum_k V_{p(k)}}{S_{fz}} \quad (5.105)$$

ここで， z_b は河床高， A_1 は1次元の砂粒の形状係数 (=1.0)， S_{fz} は河床 CV の鉛直方向射影面積である。

- (5) 河床の粒度分布計算については，平野³⁶⁾の交換層の概念を発展させ，遷移層の概念を取り入れた Liu³⁷⁾の方法を用いて(4)で求めた各粒径階の河床変動量を用いて計算する。

e) 鉛直多層構造による粒度分布計算

河床の粒度分布計算については、平野³⁶⁾の交換層の概念を発展させ、遷移層の概念を取り入れたLiu³⁷⁾の方法を用いる。Liuの方法では、Fig. 5.6に示すように河床を鉛直方向にいくつかの層に分けて計算を行う。河床面から順に交換層(mixed layer)、遷移層(transition layer)、堆積層(deposited layer)に分け、一つの交換層および遷移層と複数の堆積層を有した鉛直構造となり、各層で粒度分布情報を記憶することになる。それぞれの層の厚さは E_m, E_t, E_d とし、基準高 z_0 から河床面 z_b を以下のようにモデル化している。

$$z_b = E_m + E_t + N_b \times E_d + z_0 \quad (5.106)$$

ここで、 N_b は堆積層の総数、 E_m, E_d は一定で、遷移層の層厚 E_t については $0 < E_t \leq E_d$ の範囲内で河床計算過程において変動する。河床高の変化に応じて遷移層の厚さが変化し、粒径毎の河床変化量に応じて交換層と遷移層の粒度分布が変化する。そして、その遷移層の厚さがゼロ以下となれば堆積層の最上層が遷移層に変わり、そして遷移層の厚さが堆積層の層厚より厚くなれば遷移層が最上層の堆積層へと変化する。

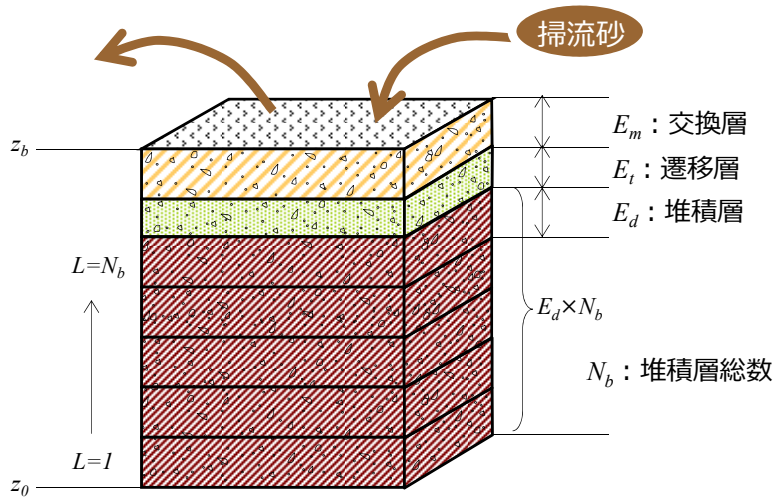


Fig. 5.6 粒度分布計算のための河床の多層構造

各層の粒度分布については、層毎に一樣と仮定してモデル化している。交換層の粒度分布 p_b 、遷移層の粒度分布 p_t 、堆積層の粒度分布 p_d の計算方法について次に記述する。 $m'+1$ ステップの各層の粒度分布、遷移層厚、堆積層数は、 m' ステップの河床変動総量 Δz_b と粒径階毎の河床変動量 $\Delta z_{b(k)} = (V_{d(k)} - V_{p(k)}) / S_{fz}$ より計算する。

河床上昇時と河床低下時の粒度分布の計算方法を次に示し、Fig. 5.7, Fig. 5.8にはその計算過程の模式図を示している。河床変動に応じて遷移層の厚さと堆積層の総数を変化させながら各層の粒度分布を計算し、鉛直方向に変化した粒度分布を記憶することになる。

●河床上昇時の粒度分布計算

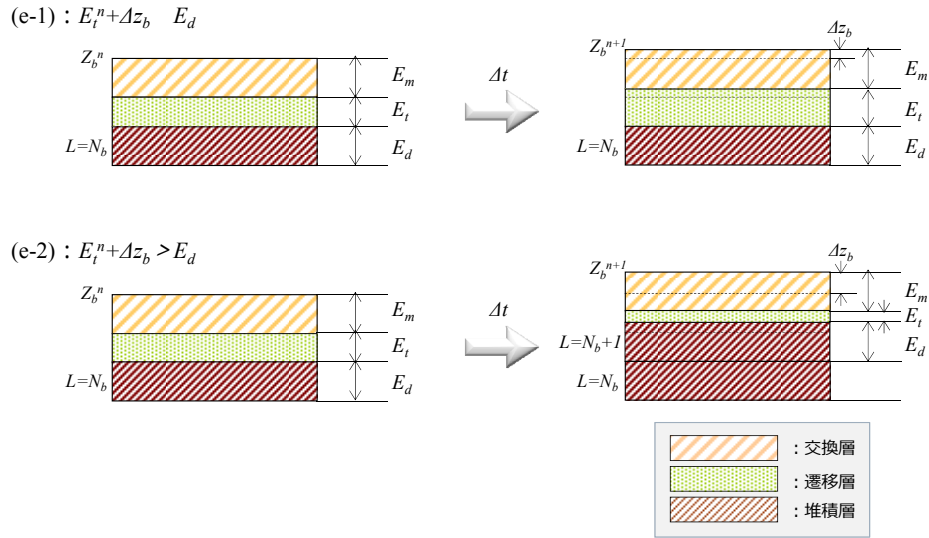


Fig. 5.7 河床上昇時の粒度分布計算の模式図

(交換層含有率の計算)

$$p_{b(k)}^{m'+1} = \left(1 - \frac{\Delta z_b}{E_m}\right) p_{b(k)}^{m'} + \frac{\Delta z_b}{E_m} p_{b(k)}^{m'} \quad (5.107)$$

(遷移層厚の計算)

$$E_t^{m'+1} = \begin{cases} E_t^{m'} + \Delta z_b & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq E_d) \\ E_t^{m'} + \Delta z_b - E_d & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > E_d) \end{cases} \quad (5.108)$$

(遷移層含有率の計算)

$$p_{t(k)}^{m'+1} = \begin{cases} \frac{E_t^{m'}}{E_t^{m'+1}} p_{t(k)}^{m'} + \frac{\Delta z_b}{E_t^{m'+1}} p_{b(k)}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq E_d) \\ p_{b(k)}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > E_d) \end{cases} \quad (5.109)$$

(堆積層数および堆積層含有率の計算)

$$N_b^{m'+1} = \begin{cases} N_b^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq E_d) \\ N_b^{m'} + 1 & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > E_d) \end{cases} \quad (5.110)$$

$$p_{d(N_b, (k))}^{m'+1} = \begin{cases} p_{d(N_b, (k))}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq E_d) \\ \frac{E_t^{m'}}{E_d} p_{t(k)}^{m'} + \left(1 - \frac{E_t^{m'}}{E_d}\right) p_{b(k)}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > E_d) \end{cases} \quad (5.111)$$

●河床低下時の粒度分布計算

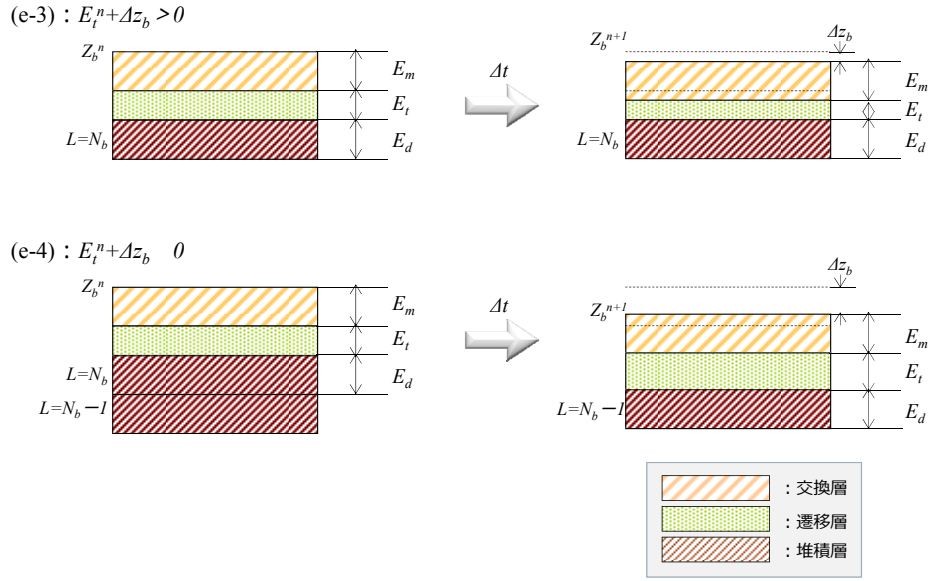


Fig. 5.8 河床低下時の粒度分布計算の模式図

(交換層含有率の計算)

$$p_{b(k)}^{m'+1} = \begin{cases} p_{b(k)}^{m'} - \frac{\Delta z_b}{E_m} p_{t(k)}^{m'} + \frac{\Delta z_{b(k)}}{E_m} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > 0) \\ p_{b(k)}^{m'} + \frac{E_t^{m'}}{E_m} p_{t(k)}^{m'} - \frac{E_t^{m'} + \Delta z_b}{E_m} p_{d(N_b, (k))}^{m'} + \frac{\Delta z_{b(k)}}{E_m} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq 0) \end{cases} \quad (5.112)$$

(遷移層厚の計算)

$$E_t^{m'+1} = \begin{cases} E_t^{m'} + \Delta z_b & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > 0) \\ E_d + E_t^{m'} + \Delta z_b & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq 0) \end{cases} \quad (5.113)$$

(遷移層含有率の計算)

$$p_{t(k)}^{m'+1} = \begin{cases} p_{t(k)}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > 0) \\ p_{d(N_b, (k))}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq 0) \end{cases} \quad (5.114)$$

(堆積層数および堆積層含有率の計算)

$$N_b^{m'+1} = \begin{cases} N_b^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > 0) \\ N_b^{m'} - 1 & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b \leq 0) \end{cases} \quad (5.115)$$

$$p_{d(N_b, (k))}^{m'+1} = \begin{cases} p_{d(N_b, (k))}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b > 0) \\ p_{d((N_b-1), (k))}^{m'} & \text{if } (E_t^{m'} + \Delta z_b < 0) \end{cases} \quad (5.116)$$

以上の a) ~ e) までを河床変動計算の過程で毎回行う。Fig. 5.9 には上記した砂粒の離脱、移動経路および堆積の計算過程について、代表一粒について模式的に示した。この一連の計算過程についてを、各メッシュおよび離脱した各粒径階について行うため、実際に存在する砂粒一つ一つの計算を行うよりは少ないが、多くの砂粒について計算を行うことになる。

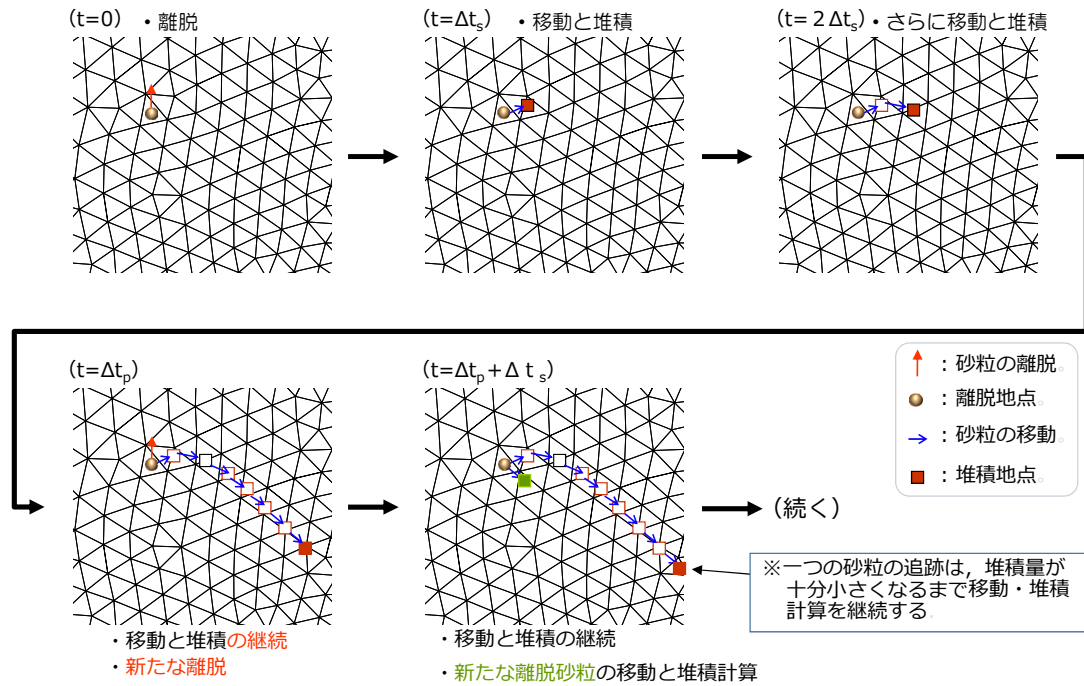


Fig. 5.9 砂粒の離脱から堆積までの計算過程

また、上に示した手法を実現するには、各メッシュから離脱した粒径階別の砂粒の各時間ステップにおける移動地点、移動距離、離脱土砂量、そして、離脱タイミングの異なる砂粒の情報についても同様に計算メモリに記憶させておく必要がある。このため、計算メモリを占有する容量が平衡流砂モデルや均一砂の計算と比べて格段に大きく、砂粒の pick-up 計算を全ての時間ステップで行うことは、計算機の記憶容量から考えて難しい。したがって、pick-up 計算をある時間間隔 Δt_p 毎に行うこととし、砂粒の運動方程式を計算する時間間隔 Δt_s より大きく設定することで記憶メモリの節約を行っている。なお、時間間隔 Δt_p 内の pick-up 量については、 Δt_p 毎に計算される Δt_p 内で pick-up される総量を計算し、細かい各計算ステップにそれを均等に割り振っている。

砂粒の運動方程式を解く計算ステップ Δt_s については、モデル内で最も小さく全ステップで計算を行い、各砂粒の移動距離に応じて deposition 量を計算する。離脱した砂粒の移動・堆積計算は、離脱時に計算される pick-up 量が堆積して無くなるまで継続して計算を行う。全ての pick-up 土砂量が堆積した時、その砂粒が占有していた記憶メモリ領域を開放し、次ステップで離脱される砂粒の記憶領域としている。

Fig. 5.10 に解析モデルのフローを示す。河床高については各ステップ Δt_s 毎に計算を行い更新するが、その上の計算格子は Δt 毎に更新された河床面を用いて再構築し次ステップの流れ計算を進める。

なお、本研究においては、移動粒子同士の衝突などの相互干渉を無視している。粒径と離脱タイミングの異なる多数の砂粒を同時進行で計算することは行っているが、各メッシュにおいて粒径階別に代表させた砂粒のみについて計算を行っているため、移動粒子の相互干渉については無視している。

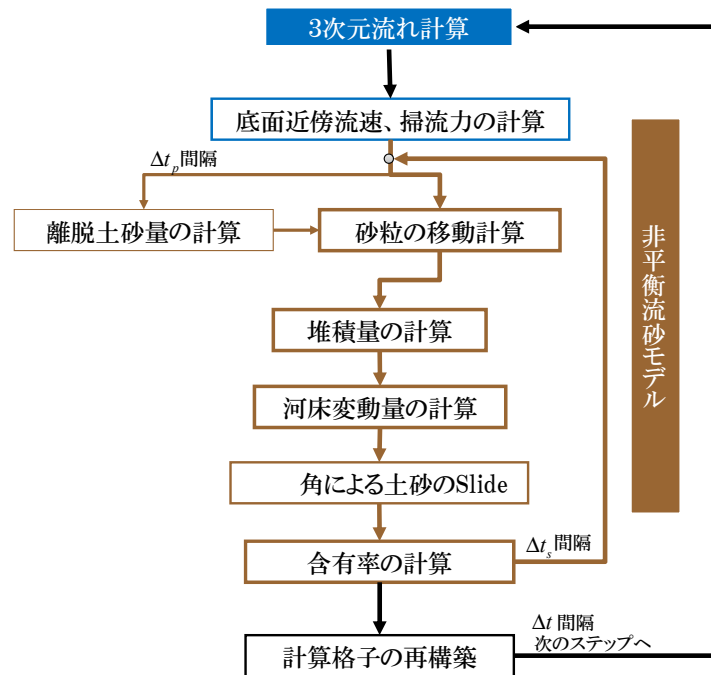


Fig. 5.10 解析モデルのフロー

f) 安息角による土砂の Slide

洗掘深が大きくなるにつれて、河床の局所勾配が増大し、非粘着性材料で構成された河床の場合、河床斜面のずり落ち (slide) が生じる。今回の水制周辺の局所洗掘現象の計算においては、河床の局所勾配が特に大きくなるため、この slide のモデル化が不可欠である。本研究では、限界角度 $\theta_{b\max}$ 以上の斜面が形成された場合、slide により限界角を保持するように、土砂移動を生じさせている³⁸⁾。

Fig. 5.1 に示すように、連結するノード $A(x_A, y_A, z_A)$ とノード $B(x_B, y_B, z_B)$ について着目してその計算過程について説明する。A より B の方が河床高が高く、河床変動計算を進める過程でその勾配が $\theta_{b\max}$ を越えた場合、B' を下げ A' を上げて限界河床勾配を越えないように砂を移動させることを考える。次の2つの式の関係より A 点、B 点の河床変化量を求める。

$$(z_B - \delta z_B) - (z_A - \delta z_A) = \tan \theta_{b \max} \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (5.117)$$

$$(S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5) \delta z_A = (S_6 + S_7 + S_8 + S_2 + S_1) \delta z_B \quad (5.118)$$

ここで、 $(x_A, y_A, z_A), (x_B, y_B, z_B)$ はノード A, B の座標値を示し、 δz_A , δz_B は限界河床勾配を維持するための鉛直方向の変化量の絶対値を示す。式(5.118)はノード A, B 変化に対しての隣接メッシュの砂の保存を表す式である。 S は CV の x-y 平面への投影面積を表し、下付き下付きの番号は Fig. 5.1 に示す例の CV 番号を表す。

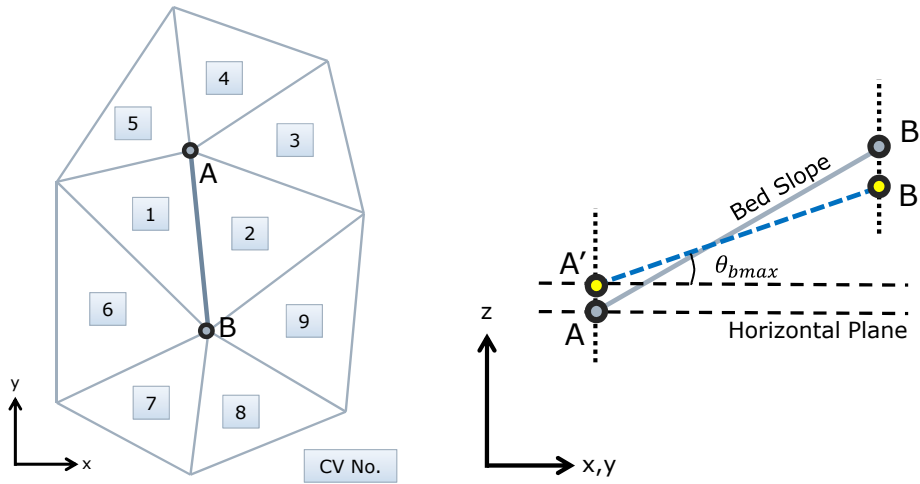


Fig. 5.11 安息角による土砂の Slide³⁸⁾

本研究では、混合砂に対して計算を行っているため、土砂の Slide に伴って河床表層の粒度変化を実現する必要がある。均一砂の場合と同様に、上記したように δz_A , δz_B を求め、その後、B 点に隣接する全ての CV に対して δz_B の河床低下として、通常の粒度分布計算と同様の計算過程で粒度分布と層厚を更新する。次に、低下させる CV の合計から求められる Slide によって移動する河床材料の粒度分布 $p_{slide(k)}$ を次式より計算する。

$$p_{slide(k)} = \frac{(S_6 p_{b(k)6} + S_7 p_{b(k)7} + S_8 p_{b(k)8} + S_2 p_{b(k)2} + S_1 p_{b(k)1}) \delta z_B}{\sum_k \{(S_6 p_{b(k)6} + S_7 p_{b(k)7} + S_8 p_{b(k)8} + S_2 p_{b(k)2} + S_1 p_{b(k)1}) \delta z_B\}} \quad (5.119)$$

そして、その粒度分布 $p_{slide(k)}$ が今度は A に隣接した全ての CV に対して δz_A の河床上昇をもたらしたという考えで通常の粒度分布計算と層厚の更新を行う。なお、混合砂の場合、式(5.118)は次式のようになる。

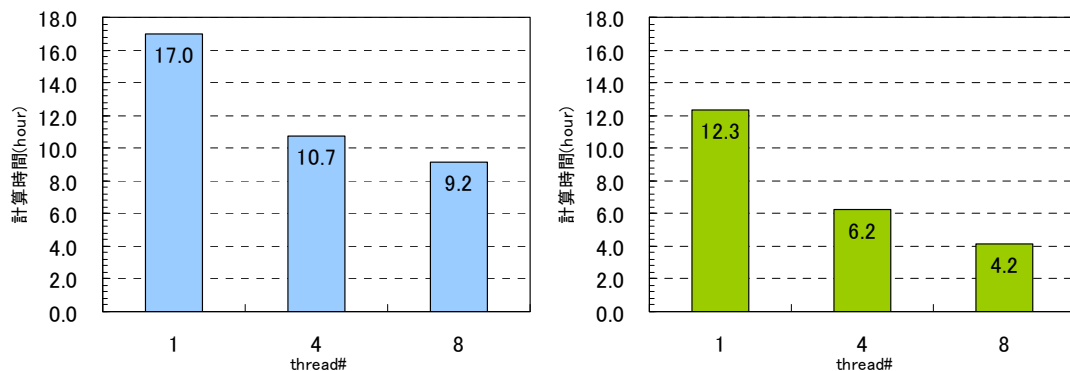
$$(S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5) \delta z_A p_{slide(k)} = (S_6 p_{b(k)6} + S_7 p_{b(k)7} + S_8 p_{b(k)8} + S_2 p_{b(k)2} + S_1 p_{b(k)1}) \delta z_B \quad (5.120)$$

なお、本研究では簡単に $\theta_{b \max}$ は水中安息角 ($\approx 32^\circ$) と設定し計算を行った。

▼5.3.3 OpenMP による砂粒経路の並列計算

近年、コンピュータに搭載される CPU のマルチコア化が進んでいる。従来の高いクロック周波数を追求する More Clock から、単一プロセッサ内に複数のコアを追加してパフォーマンスを向上させる More Cores への方向転換が進められ、現在では、デュアルコア、クアッドコアの CPU が搭載された PC が比較的容易に入手することが可能である。マルチコア化されたプロセッサの処理能力を効果的に使うためには並列プログラミングへの移行が不可欠であり、本研究では、まずその第一歩として比較的導入しやすい OpenMP を用いて 3 次元流れと非平衡流砂モデルを解くプログラムの並列化を行った。そして、その並列プログラムを水制周辺の混合砂河床の移動床実験に適用した。

Fig. 5.12(a)には、OpenMP を用いてスレッド数を 1, 4, 8 で並列処理を行った場合の実時間 10 分間の計算に要した時間の比較を示している。そして、Fig. 5.12(b)には前節の非平衡流砂モデルの a)~f)の計算過程のみの計算に要した時間の比較を示す。図より並列計算を行わない場合、非平衡流砂モデルの計算時間は解析モデル全体の 7 割程度を占めていることが確認できる。そして、並列処理により解析モデル全体としては 54%，非平衡流砂モデルの計算過程は大きく 8 スレッドで計算時間を 3 分の 1 程度に短縮することができている。本計算モデルにおいて、計算している移動砂粒の相互干渉は無視しているため、砂粒粒子を解析する順序は関係なく、各砂粒子の運動過程が設定したスレッド数で並列処理され、大きく効率化されている。しかし、全体の計算時間としては、後述する混合砂ケースの計算条件で 10 分間計算が約 10 時間かかるため、依然として計算時間は長く、流れモデルの高速化など課題は未だ残されている。



(a) 解析モデル全体

(b) 非平衡流砂モデルの計算時間

Fig. 5.12 スレッド数と計算時間の関係

5.4 平坦および洗掘河床における水制周辺3次元流れの数値解析

ここでは、3章および4章で得られた実験結果を用いて、まず水制周辺の3次元流れ場について計算を行い、流れのモデルの再現性について検証を行う。

▼5.4.1 計算ケースおよび計算条件

Table 5.4 には本節で行った3次元流れの計算ケースとその河床と水制の状態について示す。計算ケースについては、非越流状態の平坦河床と洗掘河床、そして水制高の異なる2ケースの洗掘河床について計算を行った。計算範囲については、Fig. 5.13 に示すように実験水路の一部の領域とし、延長240cmで、水制設置位置が解析範囲の中央に位置するように、上流側の固定床範囲を70cmとその下流の移動床範囲170cmを解析対象とした。計算メッシュについては、Fig. 5.14 に示すように水制から離れた位置は正方格子、水制周辺については格子が密になるよう3角形と4角形を混在させている。

Table 5.4 水制周辺3次元流れの計算ケース

Case	河床状態	水制状態	Case name of experiment
F1	平坦河床	非越流状態	U-NS
F2	洗掘河床	非越流状態	U-NS
F3	洗掘河床	越流状態 ($S_h=4.0$)	U-Sh4
F4	洗掘河床	越流状態 ($S_h=2.5$)	M-Sh2.5CS

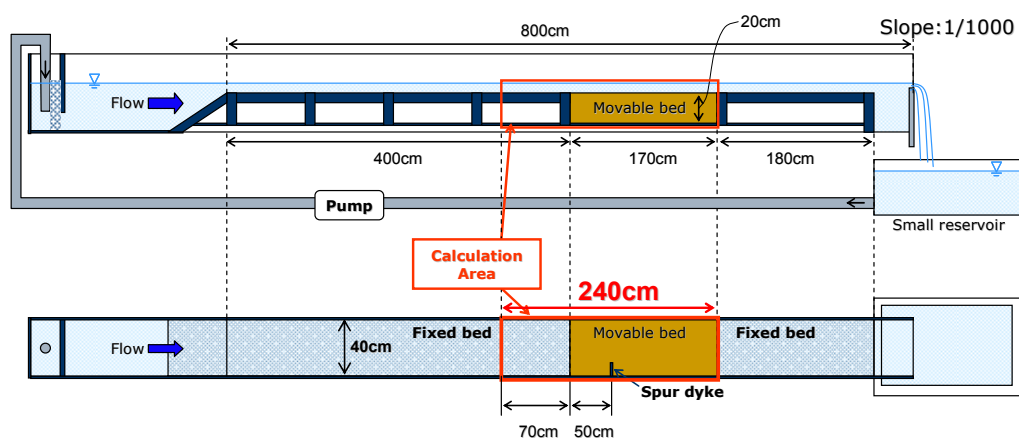


Fig. 5.13 計算範囲の位置

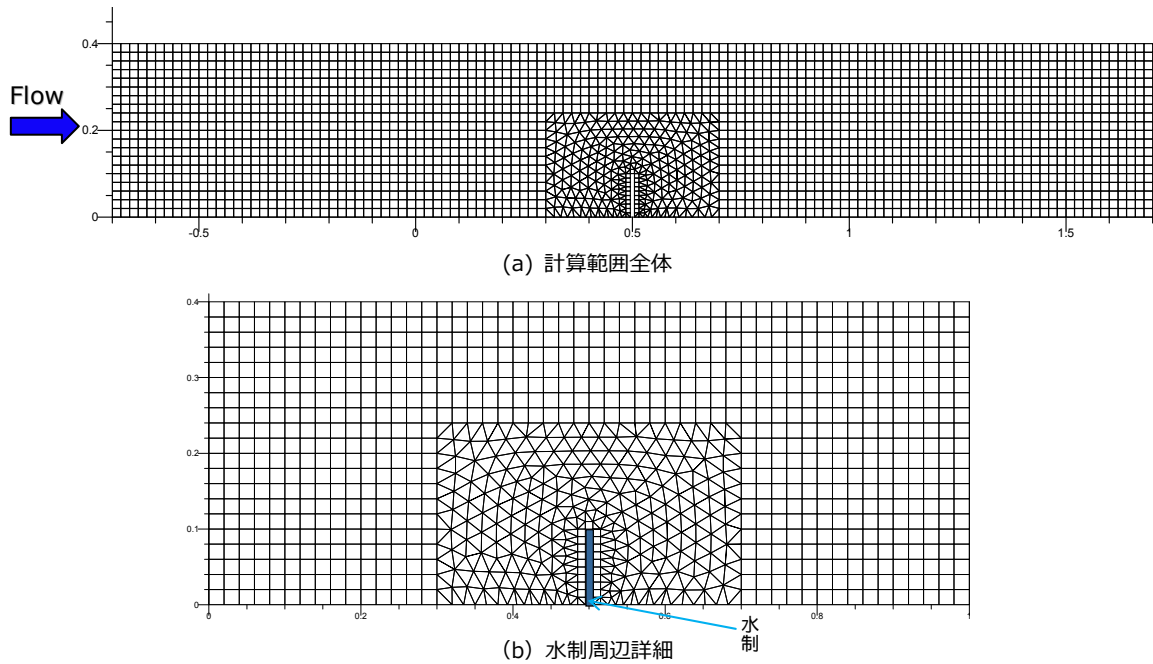


Fig. 5.14 計算メッシュ図

▼5.4.2 計算結果と考察

a) 非越流型水制周辺流れ場の再現性

Fig. 5.15 には F1 ケースの平坦河床における非越流型水制周辺の流れ場について、河床面から 1.5cm の高さにおける流速ベクトル・流速コンター図を示す。解析結果は、水制上流側と下流側の減速域、縮流による加速域、そして水制背後には平面渦が計算され、実際の流れ場を概ね再現できていると考えられる。しかし、水制背後へ向かう流れの向きに若干のずれが見られ、解析結果の方が水制背後域に回り込む流れが若干弱い傾向を示す。

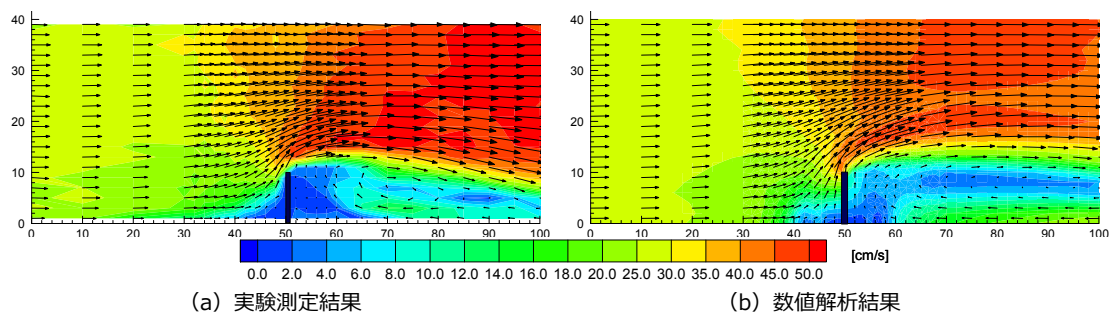


Fig. 5.15 底面近傍流速の比較 (Case F1: 平坦河床・非越流)

Fig. 5.16 には、実験最終の洗掘河床における底面近傍流速の計測結果と解析結果の比較を示している。解析結果は、水制前面から洗掘孔の縁へと向かう底面流れ、そして洗掘孔の縁近辺

の流れが局所的に弱くベクトルの向きが急変している様子が良く再現できている。水制背後においては、後流渦によって河床近辺で水制背後へ回り込む流れが存在し、その再現性も良好である。そして、水制先端から下流側の領域において徐々に流速が加速され舌状に流速が大きくなっている特徴的な底面流速場の形状も再現され、洗掘河床においても、概ね良好な解析精度が確保されていることが確認された。

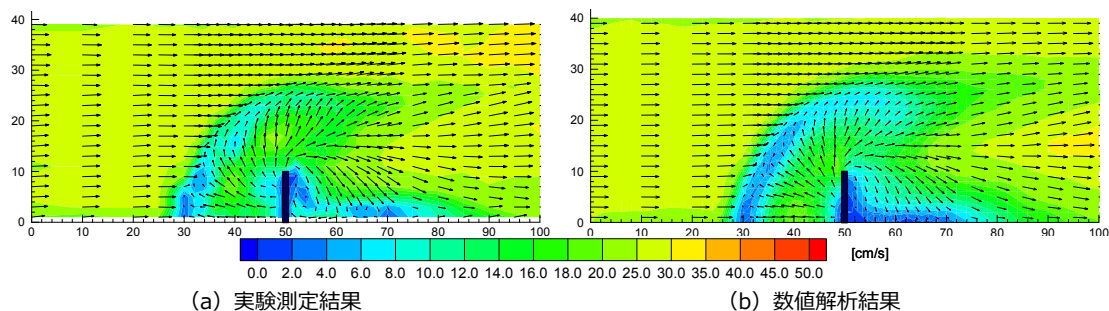


Fig. 5.16 底面近傍流速の比較 (Case F2:洗掘河床・非越流)

これらの底面近傍の流れについては、洗掘孔周辺に存在する渦によって流れの向きや大きさが支配され、その渦構造の再現性が底面流れ場の再現性へと繋がる。数値解析モデルによるその渦構造の再現性を確認するために、底面流速場だけでなく流速場の計測を行った表層流れや代表断面における流れ場について計測結果と解析結果の比較を行った。Fig. 5.17 には表層流れの比較、Fig. 5.18, Fig. 5.19 では水制の長さの中間地点である $y=5\text{cm}$ および 15cm の縦断面の流速ベクトルについて比較している。表層流れについては、水制によって先端部で流れの向きが変化し、水制背後においては $x=70\text{cm}$ の側壁近くで湧昇域が形成されるため、その地点から扇状に放射線状の流れ場が存在し、計算でも再現されている。若干水制先端の水刃ねによる偏向角が小さめとなっているが、これは現段階において水面変動を考慮していないモデルであるために偏向角が小さめに計算されたと考えられ、これについては数値解析モデルに課題が残されている点である。

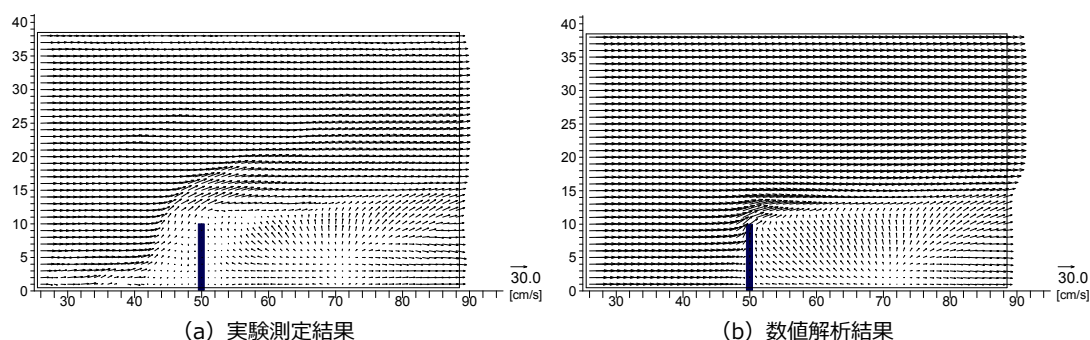


Fig. 5.17 表層流れの比較 (Case F2:洗掘河床・非越流)

Fig. 5.18 の縦断結果図より，水制前面洗掘孔内の馬蹄形渦が計算でも再現され，水制前面の下降流域や河床近傍の逆流域が良好に再現できていることが確認できる．しかし，同方向の渦が 2 つ存在するような馬蹄形渦の小さな渦構造までは再現できておらず，この点については RANS と非線形 $k-\epsilon$ モデルで再現することは難しいこと示された．小さな渦構造などの流れ場の再現性の向上を図るためには，より非定常性を考慮できる LES モデルの導入等が考えられる．

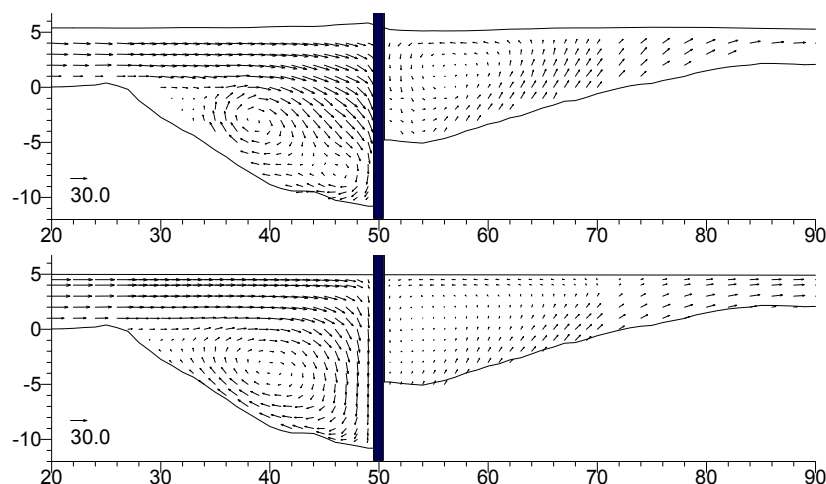


Fig. 5.18 $y=5$ 流速ベクトル縦断図（上図：実験，下図：数値解析結果）

Fig. 5.19 の水制先端から 5cm 離れた $y=15$ cm 位置の縦断図の比較より，水制頭部近傍において発生する下降流が再現され，その流れの向きは概ね良好である．

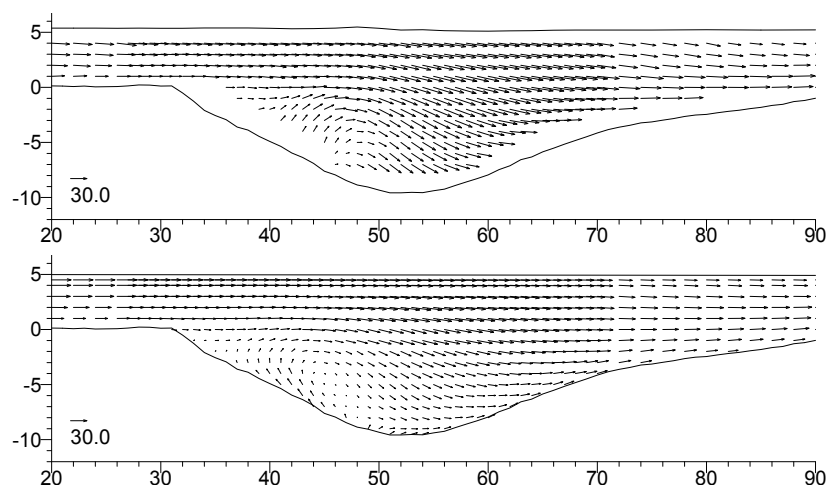
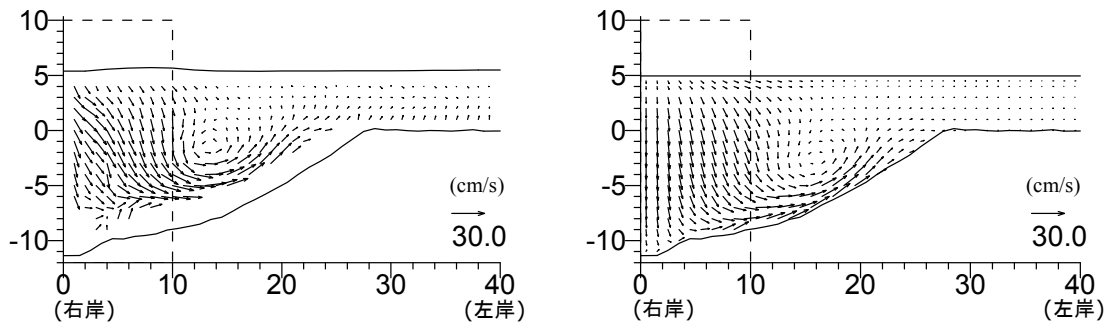
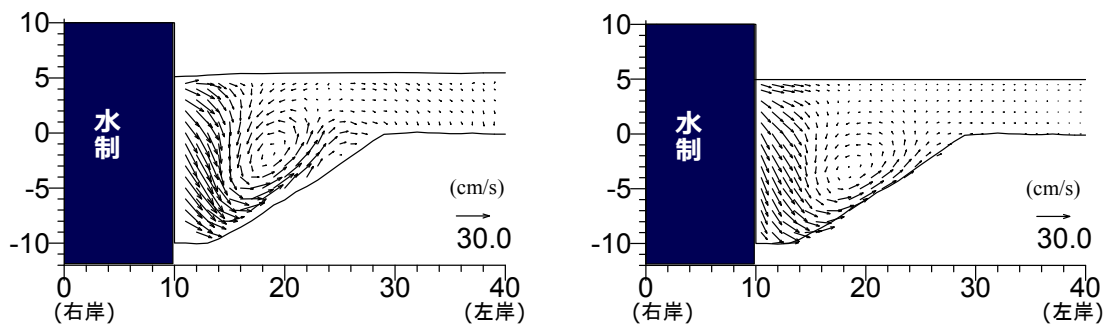
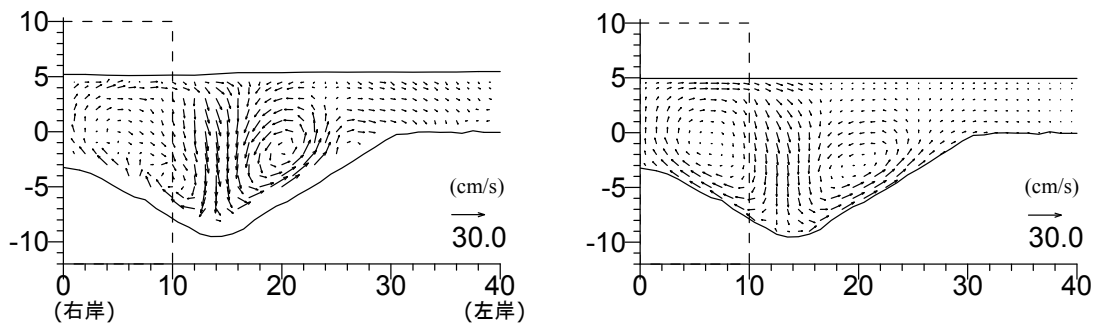
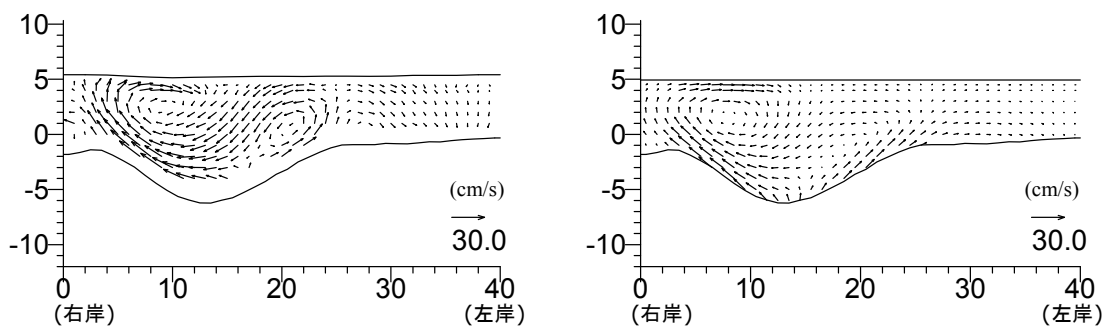


Fig. 5.19 $y=15$ 流速ベクトル縦断図（上図：実験，下図：数値解析結果）

Fig. 5.20～Fig. 5.23 は $x=45, 50, 55, 65$ の各横断面における流速ベクトルの比較を示している．横断面図の比較より，洗掘孔内の馬蹄形渦と水制背後の後流渦が解析モデルでは再現できていることが確認できる．ただし，渦による流れの向きは良好に再現できているが，渦自体の流速が若干小さめに計算されていることが図より確認できる．

Fig. 5.20 流速ベクトル図（横断面 $x=45$ ）（左図：実験，右図：数値解析結果）Fig. 5.21 流速ベクトル図（横断面 $x=50$ ）（左図：実験，右図：数値解析結果）Fig. 5.22 流速ベクトル図（横断面 $x=55$ ）（左図：実験，右図：数値解析結果）Fig. 5.23 流速ベクトル図（横断面 $x=65$ ）（左図：実験，右図：数値解析結果）

以上のように、水制周辺の 3 次元的な渦構造を良好に再現し、その渦の再現性が底面近傍の流れの精度へと繋がっていることが示された。

b) 越流型水制周辺流れ場の再現性

次に越流状態の水制の実験ケースについて計算を行った F3, F4 ケースについて結果を示す。Fig. 5.24, Fig. 5.25 には河床から 1.5cm の高さの底面近傍の流れの計算結果を示す。非越流状態の水制と同様に、洗掘孔内の河床近傍において水制前面から洗掘孔の縁へ向かう流れが越流状態の両ケースにおいて良好に再現されている。そして、水制背後へ向かう底面近傍流れの向きが、越流状態で水制高の異なる 2 ケースで若干異なるが、計算においてはその違いも再現されている。水制背後の減速域については、 $S_h=4$ ケースについては概ね良好に再現されているが、 $S_h=2.5$ ケースについては若干流速が実験値に比べて小さくなっている傾向がある。

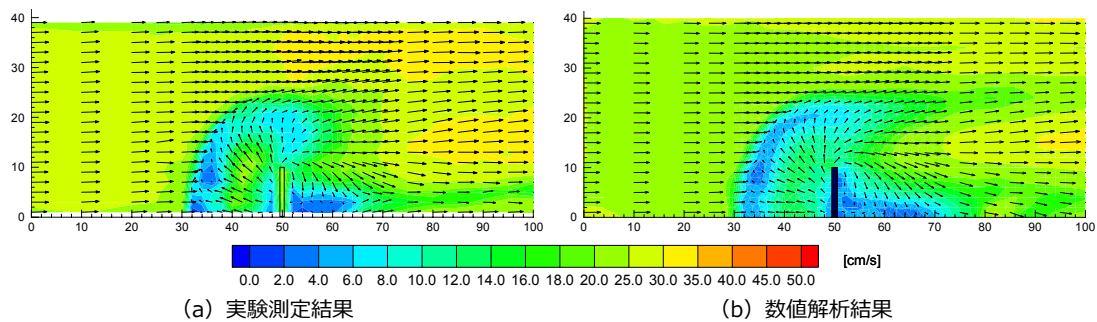


Fig. 5.24 底面近傍流速の比較 (Case F3:洗掘河床・ $S_h=4.0$)

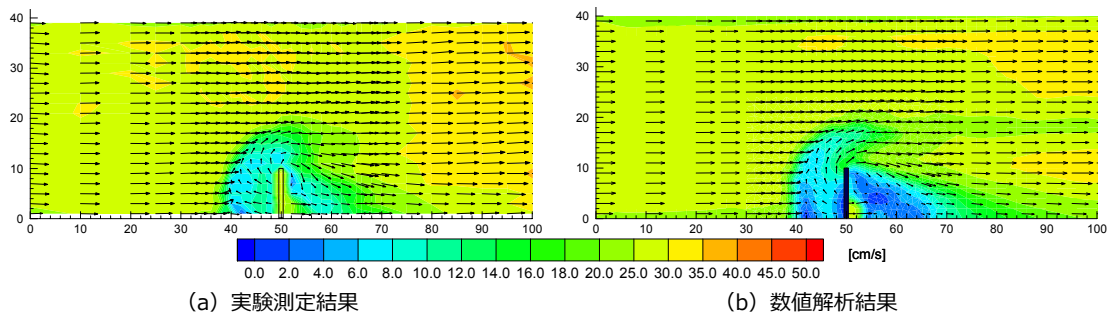


Fig. 5.25 底面近傍流速の比較 (Case F4:洗掘河床・ $S_h=2.5$)

Fig. 5.26, Fig. 5.27 には $y=5\text{cm}$ の縦断結果図を示す。両ケースにおいて洗掘孔内の馬蹄形渦は概ね良好に再現できていることが確認できる。その縦断図の水制背後域において、水制の高さ $S_h=4.0$ の F3 ケースについては、解析結果の方が若干上向き流れが弱く計算されているが流れの向きについては概ね再現されている。 $y=15\text{cm}$ の縦断結果についても概ね再現性は良好である (Fig. 5.28, Fig. 5.29)。

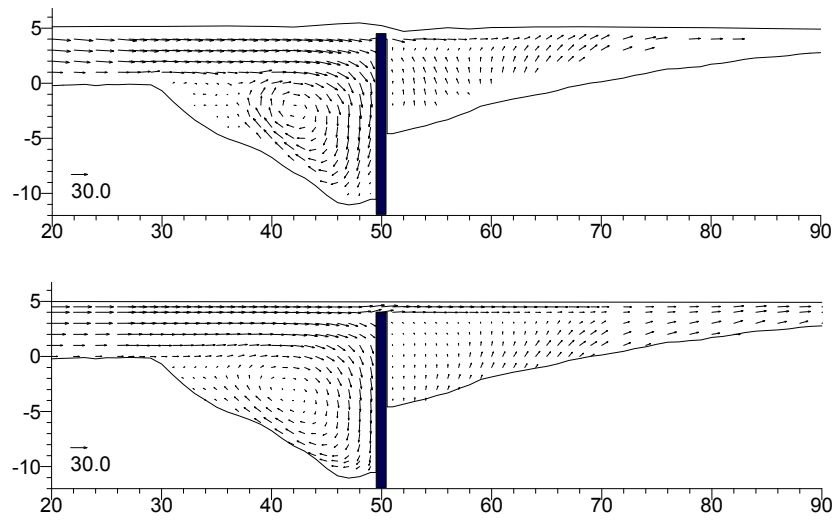


Fig. 5.26 Case F3($y=5$)流速ベクトル縦断面図（上図：実験，下図：数値解析結果）

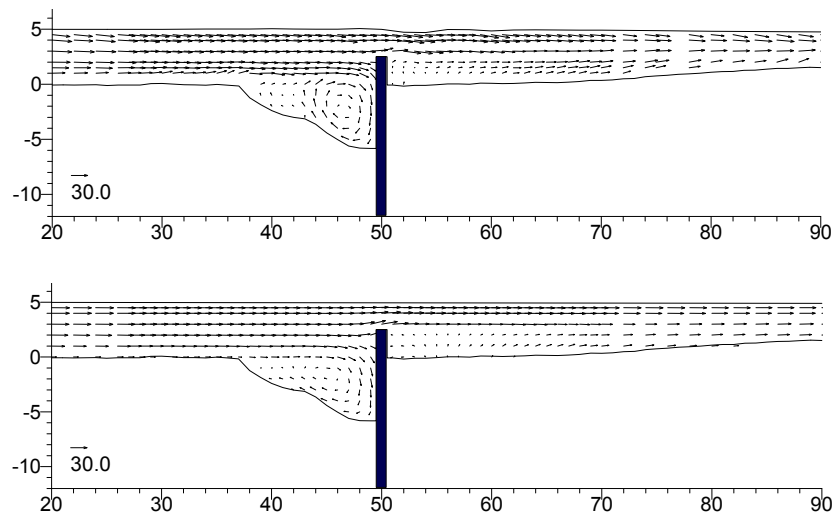


Fig. 5.27 Case F4($y=5$)流速ベクトル図（縦断面図）（上図：実験，下図：数値解析結果）

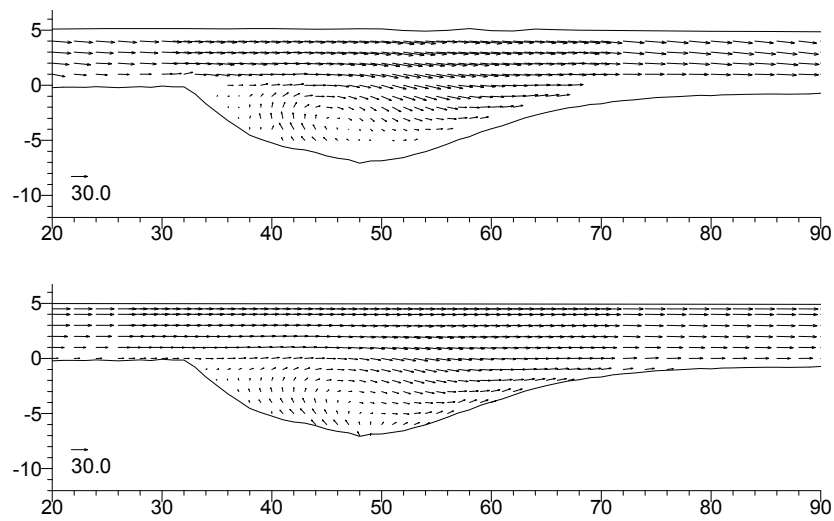


Fig. 5.28 Case F3($y=15$)流速ベクトル縦断面図（上図：実験，下図：数値解析結果）

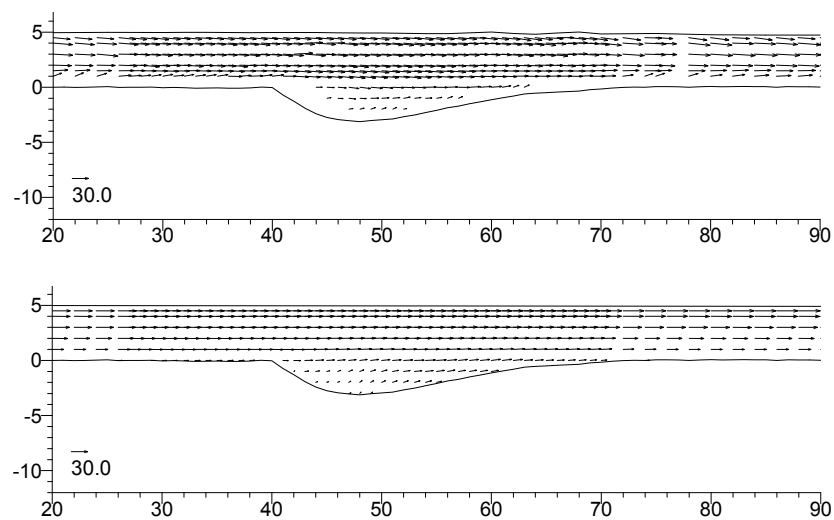


Fig. 5.29 Case F4($y=15$)流速ベクトル図（縦断面図）（上図：実験，下図：数値解析結果）

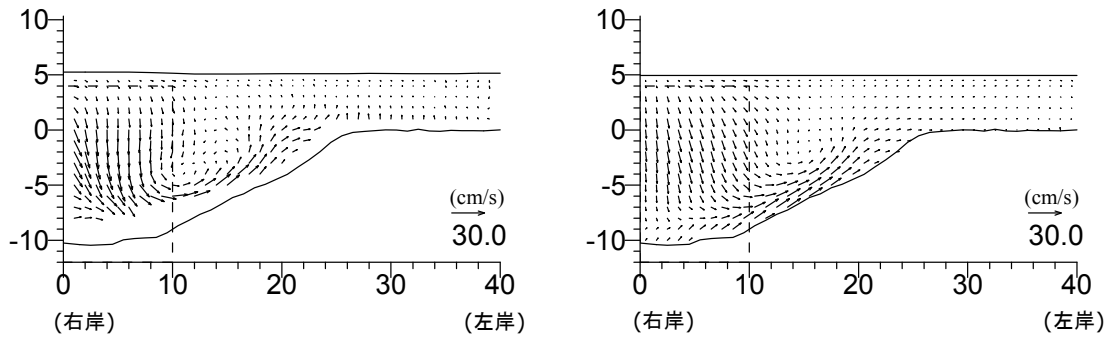


Fig. 5.30 Case F3 流速ベクトル図 (横断図 $x=45$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

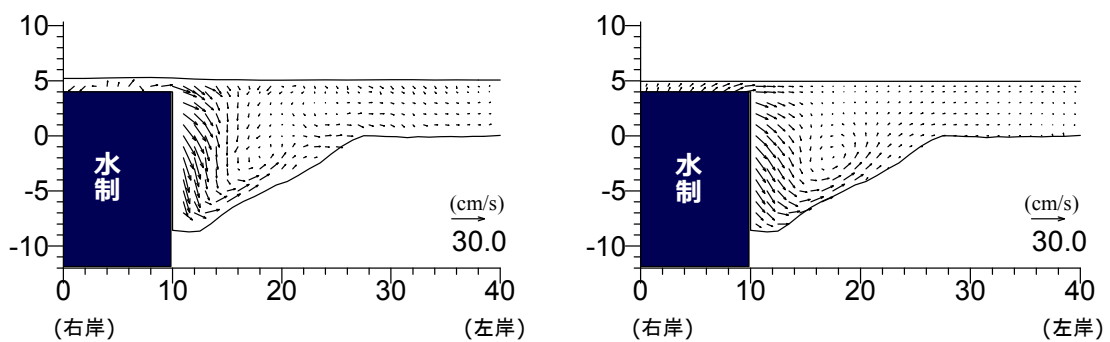


Fig. 5.31 Case F3 流速ベクトル図 (横断図 $x=50$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

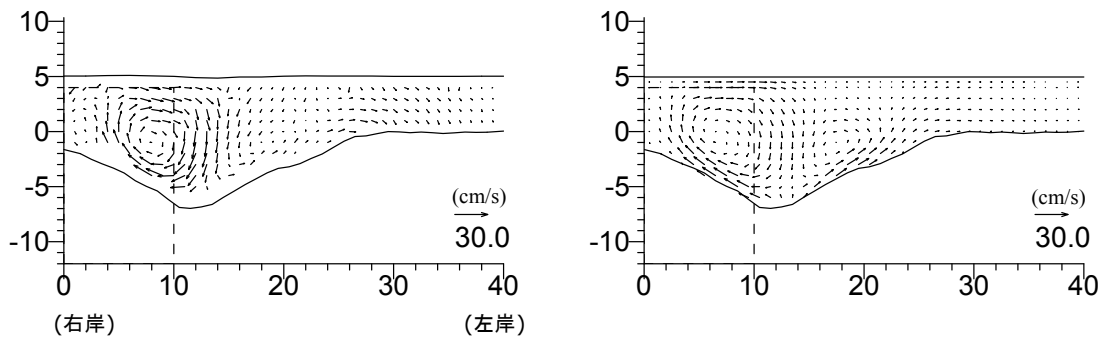


Fig. 5.32 Case F3 流速ベクトル図 (横断図 $x=55$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

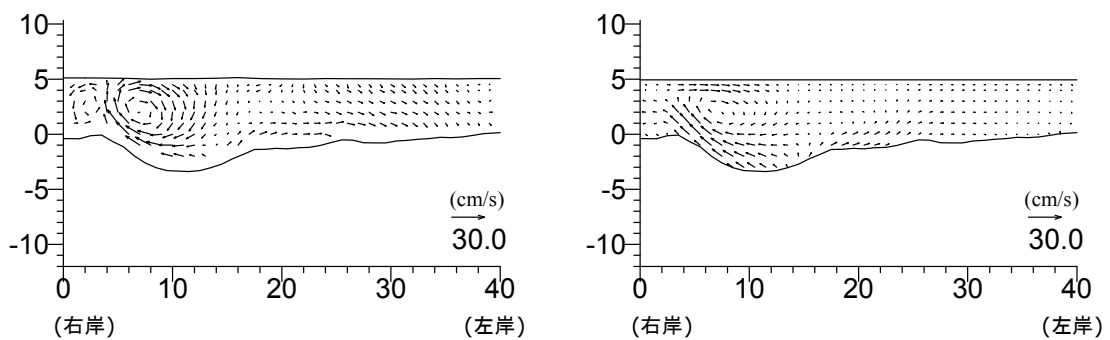
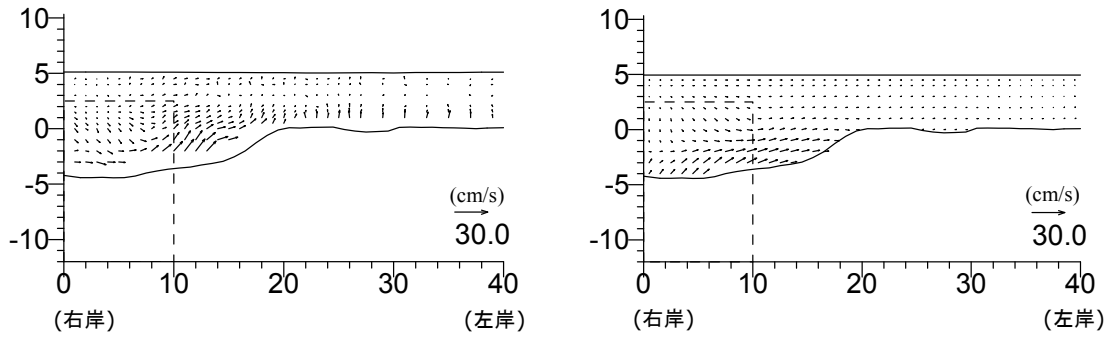
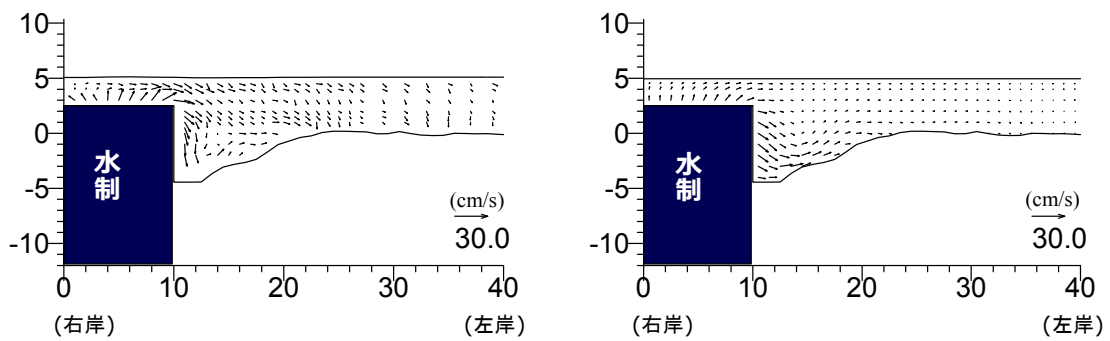
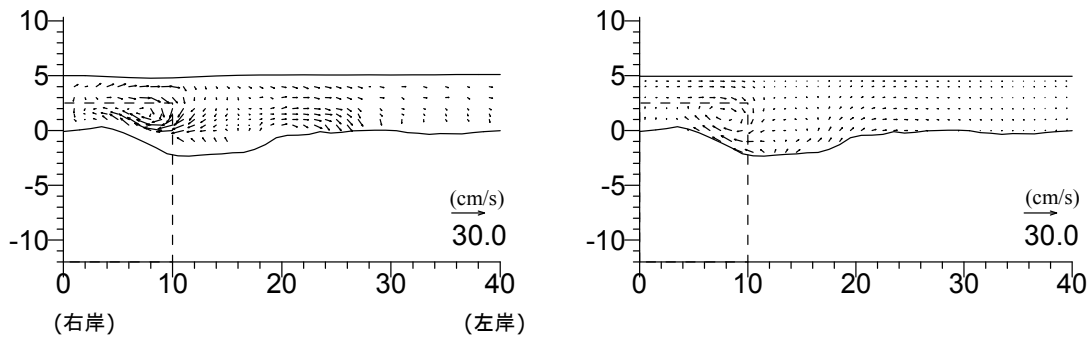
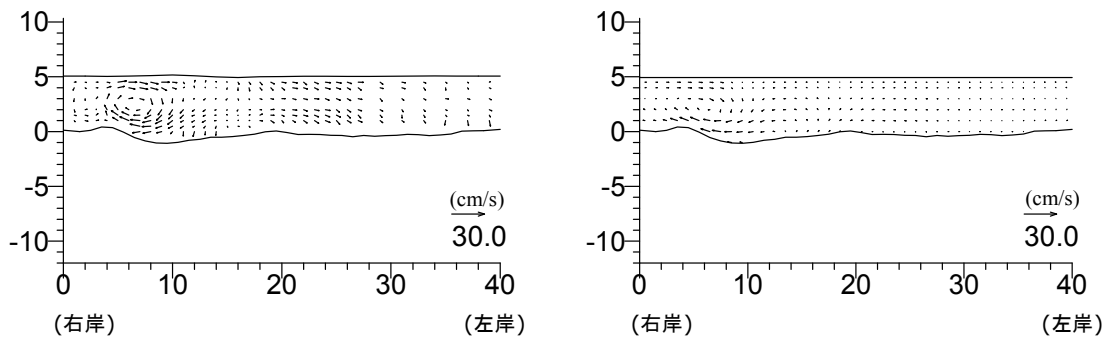


Fig. 5.33 Case F3 流速ベクトル図 (横断図 $x=65$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)


 Fig. 5.34 Case F4 流速ベクトル図 (横断図 $x=45$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

 Fig. 5.35 Case F4 流速ベクトル図 (横断図 $x=50$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

 Fig. 5.36 Case F4 流速ベクトル図 (横断図 $x=55$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

 Fig. 5.37 Case F4 流速ベクトル図 (横断図 $x=65$) (左図：実験, 右図：数値解析結果)

c) 水制頭部近傍流れの再現性

Fig. 5.38 には $x=45, 50, 55$ 断面の底面近傍流れの横断方向流速の比較図を示している。底面近傍の横断方向の流速は、水制周辺の縦渦によって支配されており、解析モデルによるその渦の再現性の結果が横断方向の流速に顕著に表れると考えられる。そして、この底面近傍の横断方向の流速は、河床地形や洗掘孔内部の粒度分布変化に直接影響を及ぼすと考えられるため、ここでは解析モデルの流れの再現精度の検証と現モデルの特徴と捉えるために越流および非越流ケースの解析結果を比較している。

図に示すように、非越流と水制の高さが異なる $Sh=4\text{cm}$ および $Sh=2.5\text{cm}$ のケース間における横断方向流れの大きさの形状と相対的な関係は再現できていることが確認できる。ただし、若干解析結果の方が小さめの値となっている傾向が見て取れる。

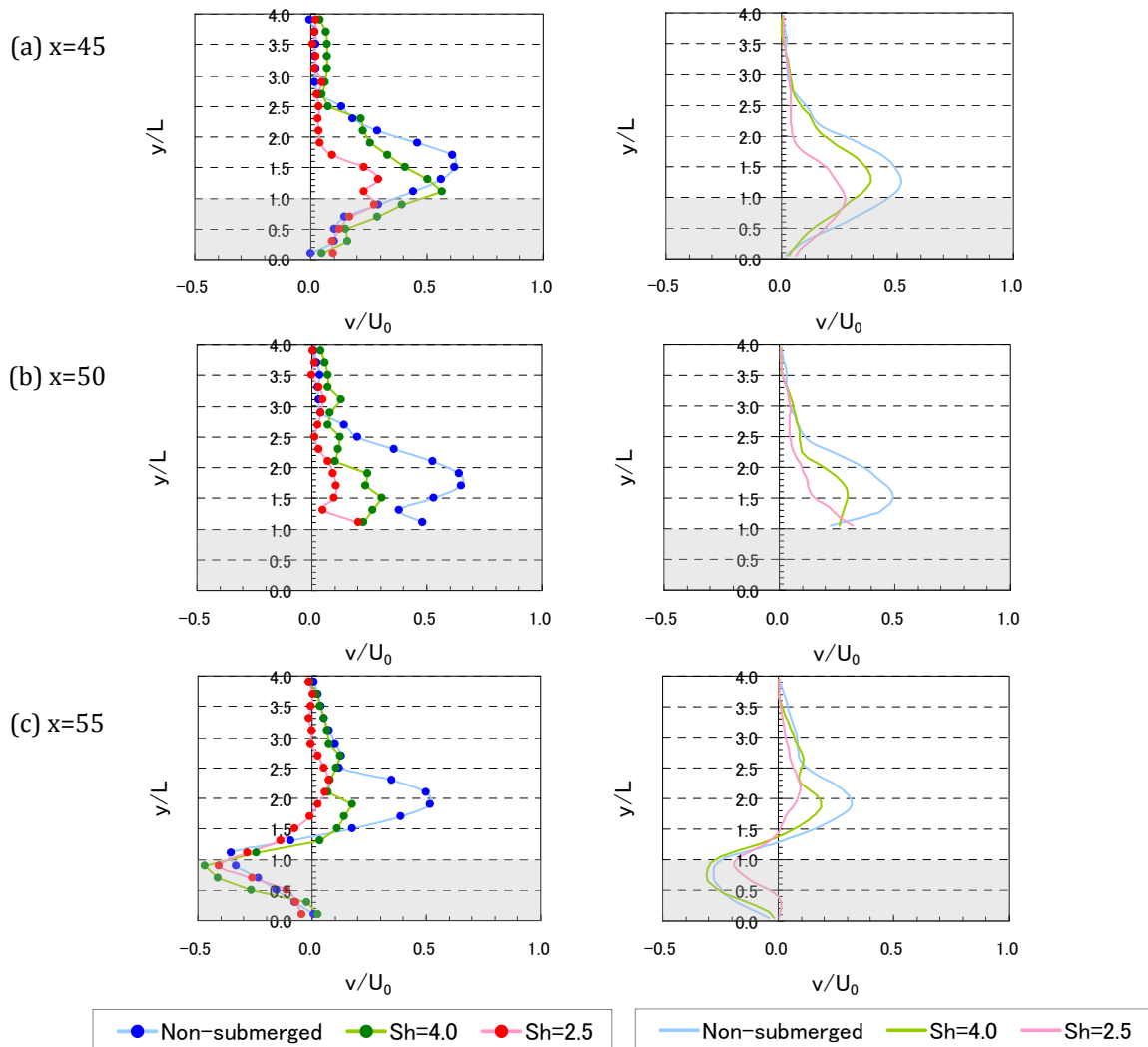


Fig. 5.38 横断方向流速の比較 (左図：実験，右図：数値解析結果)

Fig. 5.39 には水制設置位置 ($x=50$) における高さ $z=2, -1\text{cm}$ における鉛直流速の比較を示す。非越流時が最も水制先端近傍の下降流が大きく、また馬蹄形渦が顕著に存在するために局所的に上昇流が生じている範囲が存在する。そして水制が低くなる順にその水制先端近傍の下降流の大きさが小さくなり、そしてその下降流範囲の横断幅も小さくなる傾向がある。解析モデルでは、その下降流の大きさの相対的な関係、そして横断幅と水制高の関係については概ね再現できている。ただし、下降流の大きさについては解析モデルが若干小さな値が計算されている。

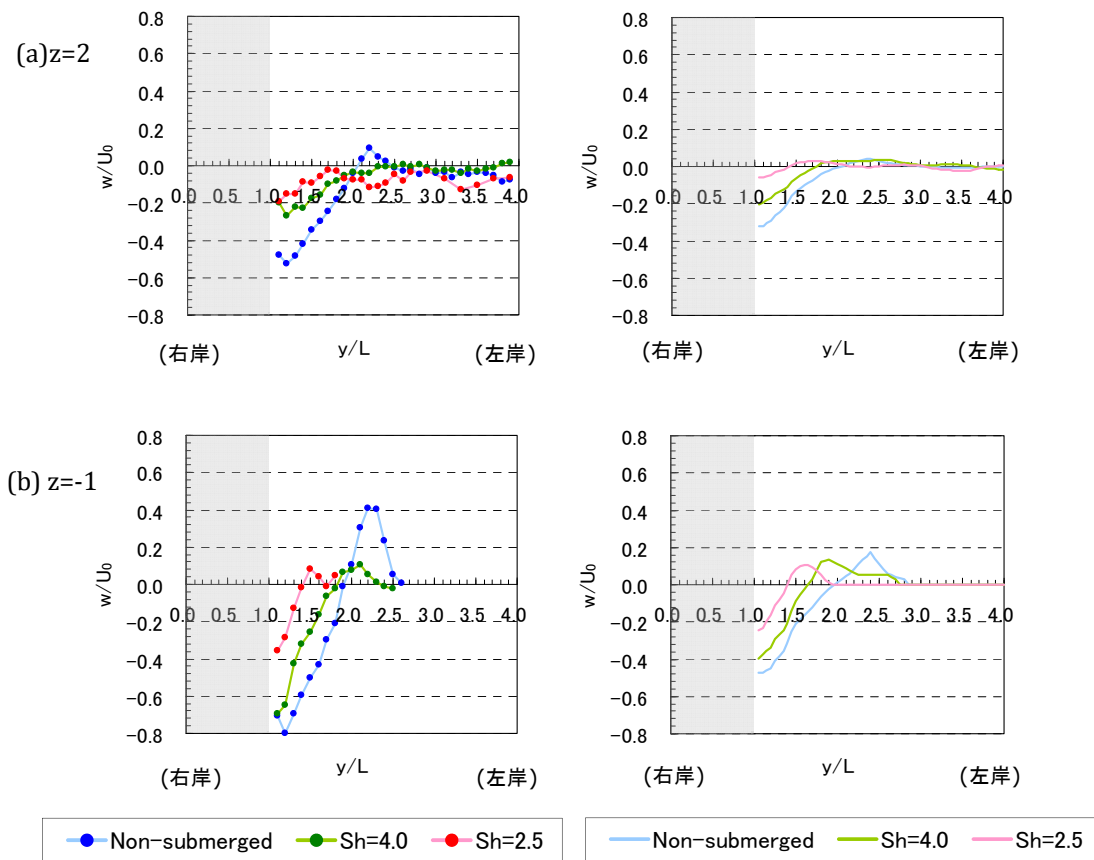


Fig. 5.39 鉛直流速の比較図 ($x=50$) (左図：実験，右図：数値解析結果)

Fig. 5.40 には $y=15\text{cm}$ に位置する縦断面の高さ $z=-1\text{cm}$ における鉛直流速の比較を示し、水制頭部近傍で生じている下降流の縦断方向の大きさがこの図より確認できる。水制設置位置より上流側では馬蹄形渦のために上昇流が発生しており、水制頭部近傍そして下流域に長く下降流範囲が存在しており、計算においても同様に上昇流および下降流域が存在している。ただし、横断結果比較時と同様に下降及び上昇流速については計算値の方が若干小さい結果となっている。

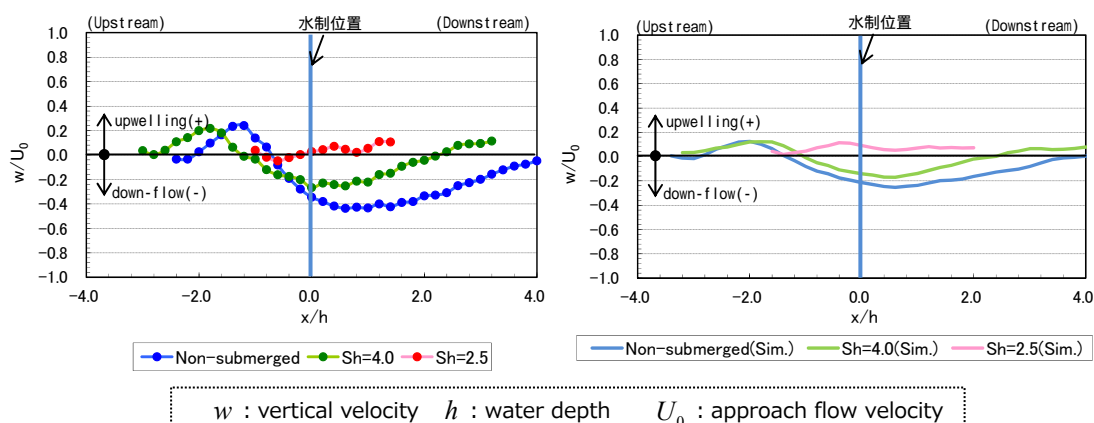


Fig. 5.40 鉛直流速の比較図 ($y=15$, $z=-1$) (左図：実験，右図：数値解析結果)

以上のように，本モデルでは，洗掘の初期である平坦河床および準平衡河床の流れ場について概ね良好な結果が得られており，河床変動計算で重要な底面流速場も良好に再現されていることが確認された。ただし，水制周辺の渦構造によって支配される流れの向きについては良好に再現されているが，渦を構成している流速は部分的に小さく計算されることが確認された。これは水制頭部で発生する下降流が若干小さめに計算されており，この下降流は水制周辺の渦の駆動力となることが考えられるため，この下降流の精度向上がさらなる流れ場の再現性向上へとつながると考えられる。

▼5.4.3 線形と非線形 $k-\varepsilon$ モデルの計算結果比較

前節では，3次元 RANS モデルと非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる解析結果と実験結果の比較を行い，計算モデルの再現性と実測値の違いの傾向を把握することに努めた。本解析モデルの流速と圧力を連立して繰り返し計算によって流れの収束場を得る SIMPLE 法において，非線形 $k-\varepsilon$ モデルでは標準型 $k-\varepsilon$ (線形) モデルに比べて1ステップの収束解を得るために約3倍の時間を要している。標準型 $k-\varepsilon$ モデルで本研究の混合砂実験の3時間に亘る移動床現象を計算するのに，高価な計算機を用いても現在では約1ヶ月弱(25日程度)の時間を要しており，非線形 $k-\varepsilon$ モデルではその3倍近くの時間を要することになり，実務の場合では非現実的な計算時間となってしまう。今後，様々な設定条件において複数ケースの計算を行い，その中から最適な水制設計条件を導き出すような手順を考えた場合，標準型 $k-\varepsilon$ モデルによって解析を進めることの方が現段階では時間的に大変有利である。

本節では，その工学的な観点から有利な標準型の線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた場合と非線形 $k-\varepsilon$ モデルによって得られる3次元流れ場の解析結果の違いを確認し，その傾向を把握することに努めた。比較ケースとして，非越流場の洗掘河床条件の F2 ケースについて計算を実施している。

Fig. 5.41 には $y=5\text{cm}$ の縦断面，Fig. 5.42 には水制設置位置 $x=50\text{cm}$ の横断面について，実測および線形および非線形 $k-\varepsilon$ モデルの流速ベクトル結果図を示す。縦断面図においては水制前面

および水制背後において、線形および非線形 $k-\epsilon$ モデル間で大きな違いがないことが確認できる。Fig. 5.42 の横断結果図からは、線形渦粘性モデルでは馬蹄形渦を構成している流れの速度が非線形モデルに比べて小さくなる傾向が示された。

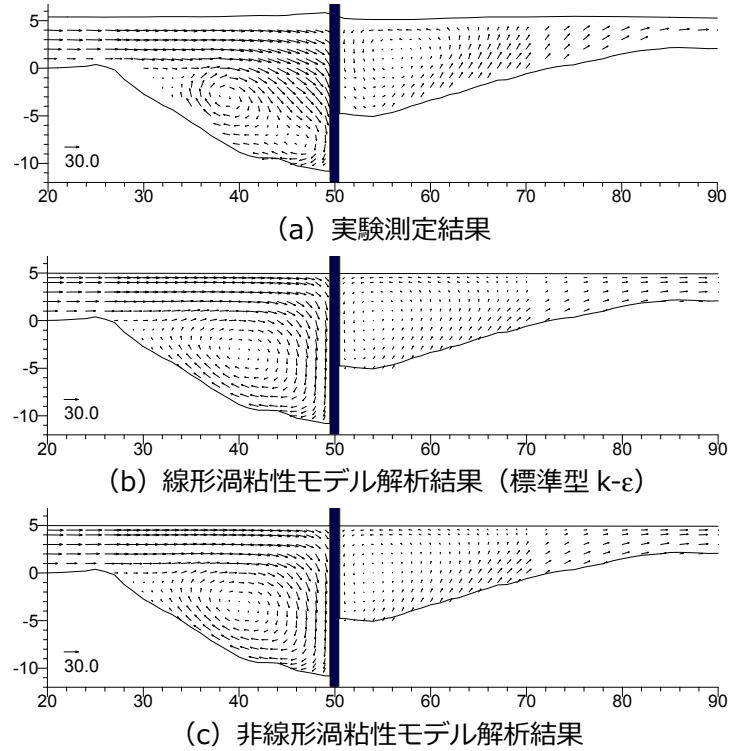


Fig. 5.41 $y=5$ 流速ベクトル縦断面図

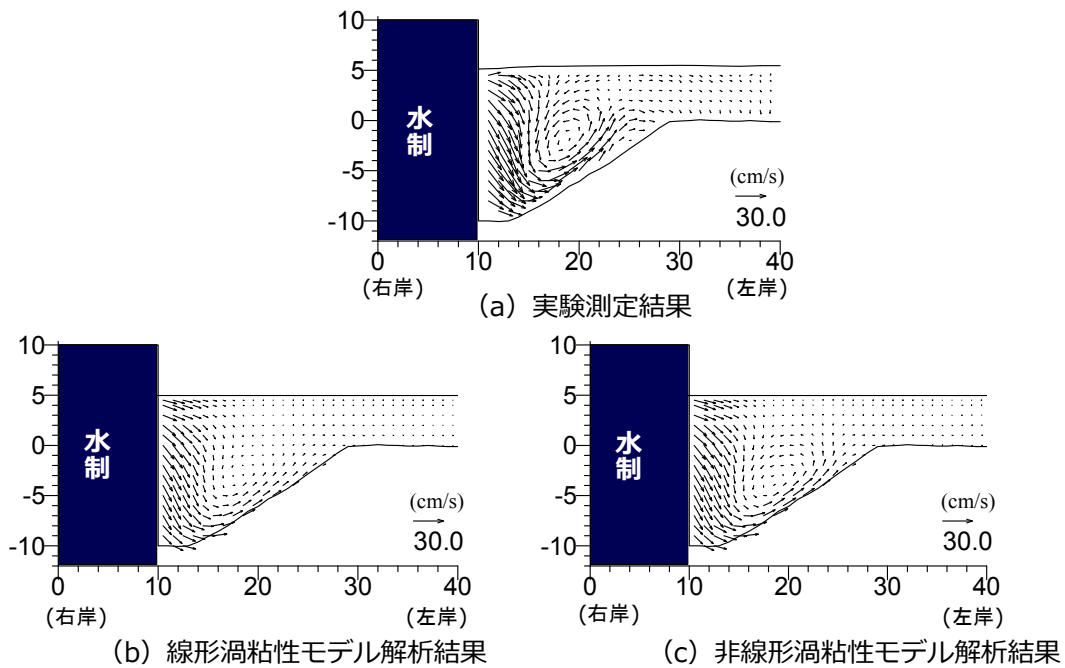


Fig. 5.42 流速ベクトル図 (横断面 $x=50$)

Fig. 5.43 は河床から 1.5cm の高さの底面近傍流速の比較図を示す。流速ベクトルの向きに関する全体の平面的な傾向は、線形モデルについても概ね良好な再現結果が得られていることが確認できる。ただし、水制設置位置の横断面比較 (Fig. 5.42) から確認された、水制頭部域における馬蹄形渦の流速が線形モデルでは小さめに計算される傾向が底面流速場の結果図からも確認され、水制頭部域において水制先端から左岸へ向かう底面流速が線形モデルでは非線形モデルに比べて小さく計算されている。そして、水制頭部の下流域に舌状に流速が加速される形状やその左岸側の相対的に流速が低減される縦断領域 (赤線で囲った範囲) については、線形モデルの解析では非線形モデルに比べて流速低減域が顕著に表れない傾向が示された。

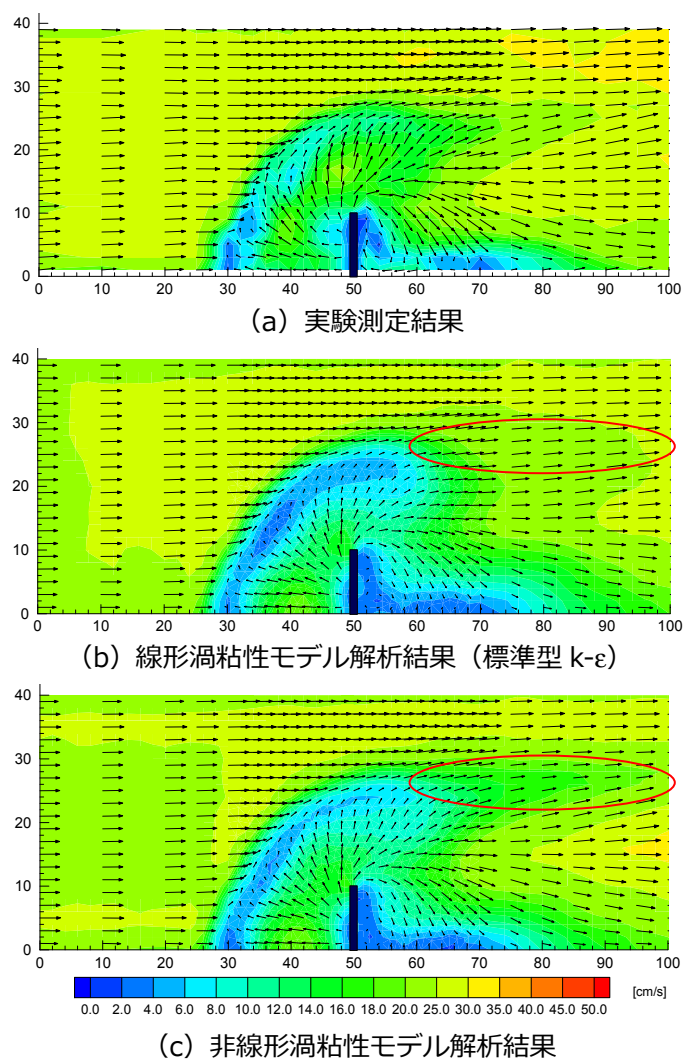


Fig. 5.43 底面近傍流速の比較 (Case F2:洗掘河床・非越流)

Fig. 5.43 の赤線で囲んだ流速低減領域の原因と考えられる馬蹄形渦による上向き流速の渦粘性モデル間の違いを把握するために、鉛直流速の水深平均値を求めて比較を行った (Fig. 5.44)。線形および非線形モデル間では、洗掘孔の縁の内側に存在する馬蹄形渦の上昇流領域において違いが見られ、上昇流速については線形モデルの方が小さく計算されていることが確認できる。

また、線形モデルでは斜面を駆け上がるように上昇流が発生していることから、洗掘形状に沿って洗掘孔縁の内側に上昇流領域が生成されている。非線形モデルについては、水制上流側においては線形モデルと同様に洗掘形状に沿って上昇流領域が形成されているが、水制設置位置より下流側の馬蹄形渦により形成される上昇流領域については、線形モデルと異なり洗掘形状には沿わず、そのまま下流に向かって上昇流領域が形成されている。この上昇流速の違いの影響により、渦粘性モデル間において Fig. 5.43 の流速低減の違いが生じたことが確認できる。なお、下降流域については僅かだが非線形モデルの方がその範囲が大きいことが Fig. 5.44 より確認できる。

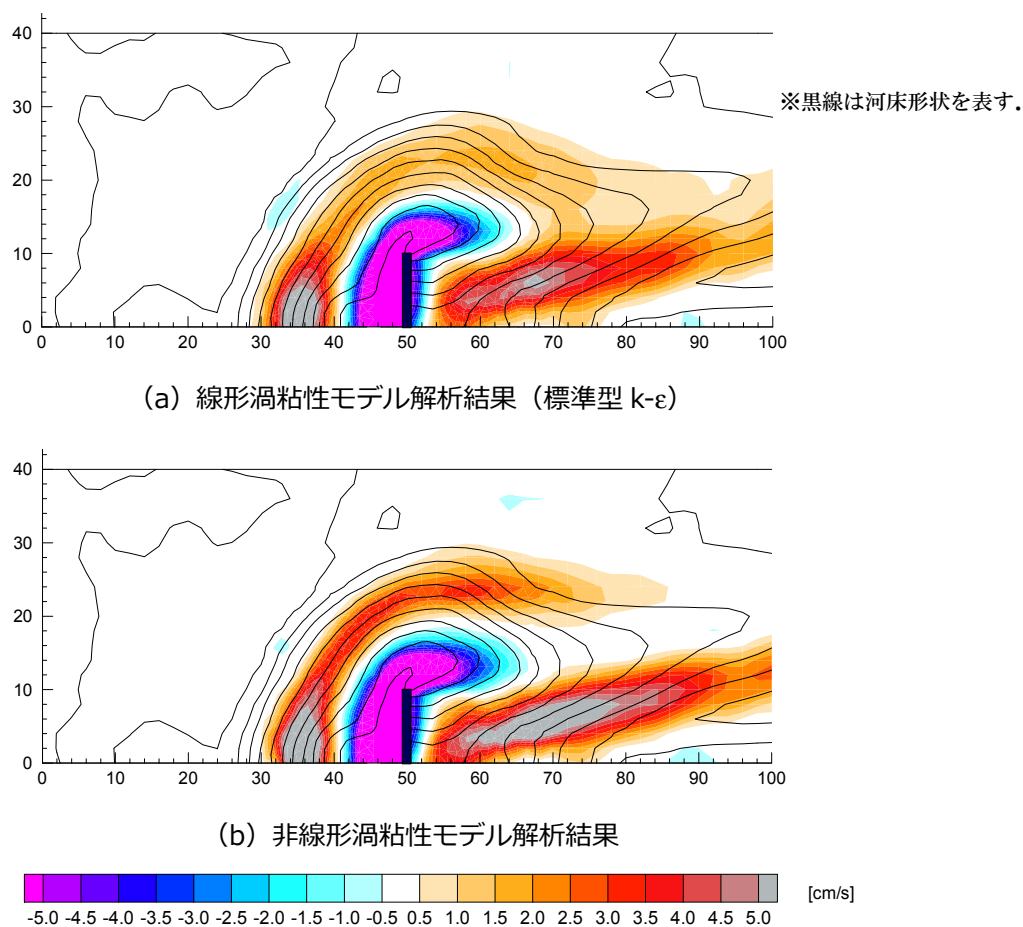


Fig. 5.44 鉛直流速の水深平均値の比較

Fig. 5.45 には、 $x=50, 55, 60, 65$ 断面における底面流速の横断方向流速成分の比較図を示す。図に示す通り、底面近傍の横断方向の流速については、線形モデルでは若干小さめに算定されており、非線形 $k-\epsilon$ モデルの方が実験の計測結果に近いことが確認できた。次に Fig. 5.46 には $x=50\text{cm}$ 位置の高さ $z=-1, 0, 1, 2$ における鉛直流速の比較を示している。線形モデルと非線形モデル共に水制頭部近傍の下降流が小さめに計算されているが、下降流の大きさについてモデル間で大きな差は生じていないことが確認できる。ただし、馬蹄形渦の再現性から上昇流域において若干非線形モデルの方が実測値に近いことが確認できる。

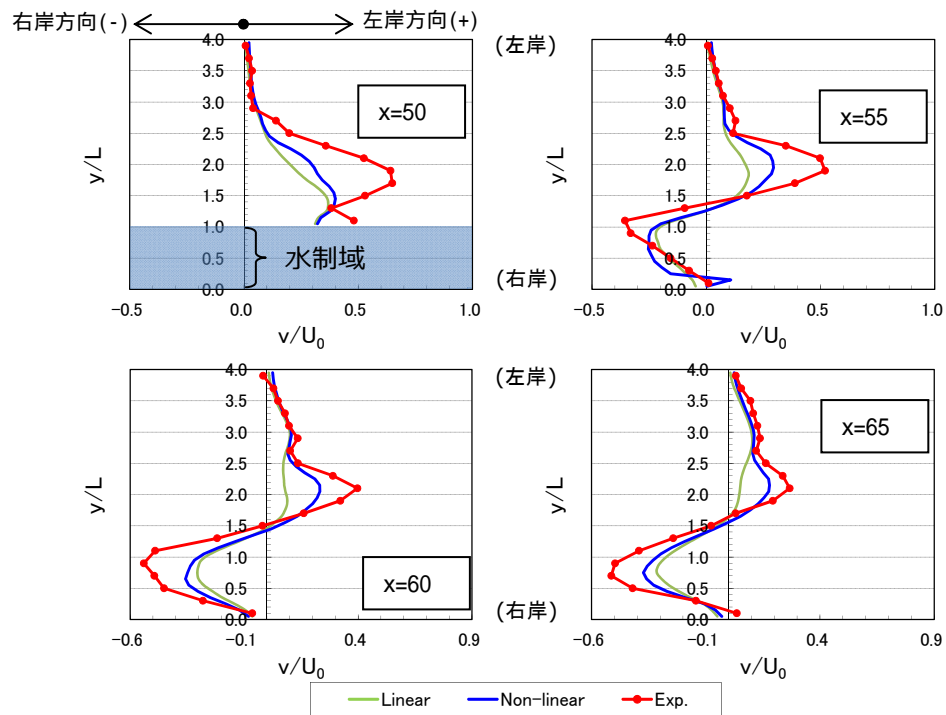
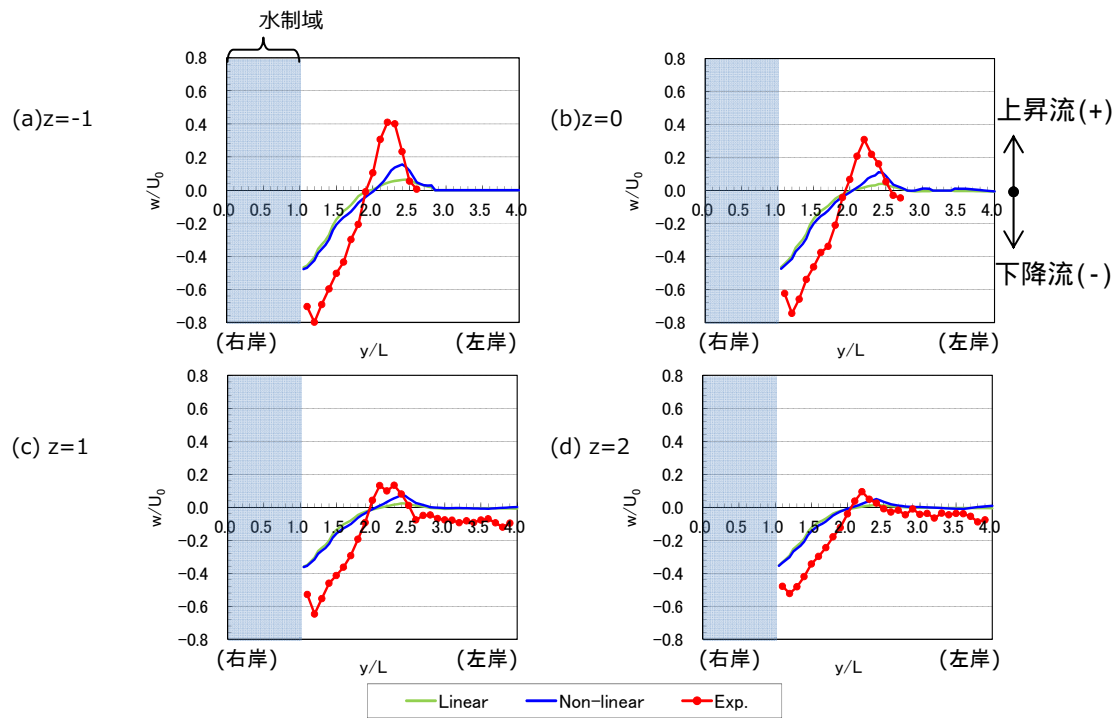


Fig. 5.45 底面近傍の横断方向流速の比較



w : 鉛直方向流速 h : 水深 U_0 : 接近流速 L : 水制長

Fig. 5.46 鉛直流速の比較図 ($x=50$)

k-εモデルは工学的な分野で多く使用されているが、標準型の線形モデルでは等方的渦粘性表現を用いているため、非等方性に起因する現象を再現できない欠点があり、流れが減速する衝突部などの流れが淀む領域において乱れエネルギー k が過剰生成され、全体の流れの予測精度を悪化させる。Fig. 5.47 には $x=50$ 断面における接近流速によって無次元化した乱流エネルギー分布図を示す。そして、その乱流エネルギーから求められる渦粘性係数の分布図を Fig. 5.48 に示す。図に示すように、水制頭部の洗掘孔内において線形モデルでは乱流エネルギーが非線形モデルに比べて過剰に生成されており、その影響で渦粘性係数が過大評価されていることが確認できる。この乱れエネルギーの過剰生成による大きな渦粘性係数によって、線形モデルでは非線形モデルに比べて水制頭部において蹄形渦が顕著に表れず Fig. 5.44 に示したような上昇流の違いが生じ、そして、河床近傍においては水制頭部近傍の左岸方向の横断流速が小さく算定される傾向があることが確認できた。

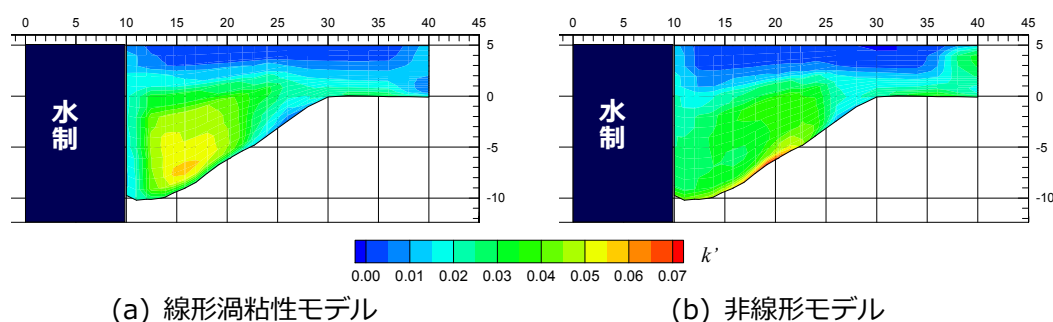


Fig. 5.47 水制設置横断面における乱流エネルギー分布図 ($k' = k/U_0^2$)

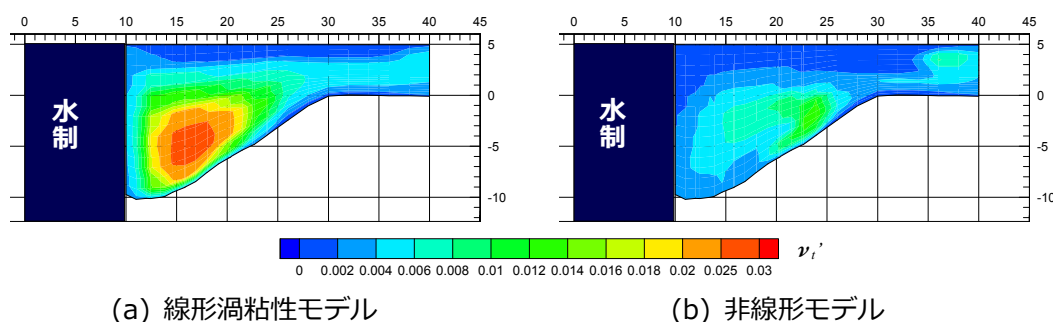


Fig. 5.48 水制設置横断面における渦粘性係数分布図 ($\nu_t' = \nu_t/(U_0 h)$)

以上のように、線形渦粘性モデルでは、非線形モデルに比べて水制頭部の河床近傍において横断方向流速が小さく算定される傾向は見て取れたが、底面流速場において大きな差は生じておらず、河床変動計算を行う際に渦粘性モデルの違いによって、大きな河床高結果の違いを生まないことが推測できる。

5.5 混合砂非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動シミュレーション

本節では，3章および4章で得られた実験結果を検証材料に，先述した3次元流れと混合砂の非平衡流砂モデルを用いて水制周辺の河床変化と粒度分布が予測可能な解析モデルの構築と解析モデルの妥当性の検証を行った。

▼5.5.1 計算ケースおよび計算条件

Table 5.5 には上述した混合粒径の非平衡流砂モデルにより計算を行った河床変動計算ケースについて示す。解析対象とした実験ケースは，幾何標準偏差 $\sigma_g=2.55$ の河床材料でカラーサンドを用いた混合砂実験で，非越流と水制の高さの異なる2つの越流ケースの合計3ケースの実験についてシミュレーションを実施した。計算範囲については，前節で示した流れ解析と同様とし，計算メッシュについても同様のものを用いた。計算モデルの設定条件をTable 5.6に示し，各計算ケースで共通となっている。

Table 5.5 河床変動計算の計算ケース

Case	水制条件	河床材料条件	Case name of experiment	流砂モデルおよび渦粘性モデル
B1	非越流	混合砂, $D_{m0}=1.03$	M-NSCS	① 非平衡流砂モデル+非線形 k- ϵ モデル ② 非平衡流砂モデル+線形 k- ϵ モデル ③ 平衡流砂モデル+線形 k- ϵ モデル
B2	越流 ($S_h=4.0$)	混合砂, $D_{m0}=1.03$	M-Sh4CS	・線形 k- ϵ モデル
B3	越流 ($S_h=2.5$)	混合砂, $D_{m0}=1.03$	M-Sh2.5CS	・線形 k- ϵ モデル

Table 5.6 計算の設定条件

項目	設定値
流れの計算時間間隔	0.1 (sec.)
砂粒の移動計算間隔	0.005 (sec.)
離脱土砂の計算間隔	0.2 (sec.)
計算の総粒径階	9
代表粒径(mm)と含有率(%)	※粒径の小さい方から順に 0.137(11.26), 0.354(22.54), 0.596(3.94), 0.777(7.80), 0.922(9.20), 1.183(13.21), 1.543(13.61), 1.844(10.74), 2.173(7.70) () 内は含有率(%)を示す。
河床層厚	交換層：2.5mm 遷移層：0.0～2.5mm の間で時間変化 堆積層：2.5mm
空隙率	38.5(%)
土砂の Slide 発生の河床勾配角	32 (degree) ※水中安息角

B1 ケースのみ、渦粘性モデルに非線形と線形（標準型 $k-\varepsilon$ モデル）の両モデルで計算を行い、渦粘性モデルの違いが河床変動計算に及ぼす影響について検討を行った。先述したように非線形モデルは、線形モデルに比べて流れ 1 ステップの収束計算に約 3 倍の時間を要している。近年、計算機の進歩が目覚ましいとは言え、現象を再現する実時間と計算モデルの負荷を考えると、現状では線形 $k-\varepsilon$ モデルの方が工学的な観点から有利と言える。そして、さらに B1 ケースについては、その線形 $k-\varepsilon$ モデルと平衡流砂モデルを用いたシミュレーションも実施し、平衡と非平衡流砂モデルの計算結果の比較を行った。平衡流砂モデルについては、砂の移動限界や流砂量の違いに非平衡流砂モデルと差が生じないように式(5.84)を用いて pick-up rate p_s を求め、次式より粒径階 k 毎の流砂量 $q_{B(k)}$ を求めた。

$$q_{B(k)} = \frac{A_3}{A_2} p_{s(k)} \Lambda d_{(k)} p_{b(k)} \quad (5.121)$$

平衡流砂モデルでは、上記の式より計算された流砂量について、非平衡流砂モデルと同様に式(5.92)を用いて砂粒の移動方向を計算し、その初期移動速度より流下方向および横断方向の流砂量フラックスに変換した。その後の河床粒度分布および安息角による土砂のずり落ち計算は、平衡および非平衡流砂モデルにおいて違いはない。従って、ここでの平衡および非平衡流砂モデルによるシミュレーションの違いは、平衡流砂モデルは砂粒の移動する時間を無視した移動速度無限大モデルであるため、各メッシュで計算されたタイムステップ当り流砂量が 1 ステップで隣接メッシュに全て移動するのに対して、非平衡流砂モデルでは砂粒の移動速度と移動距離に応じて移動経路上に土砂が輸送される点である。

なお、Table 5.5 のケース B2, B3 は越流型水制周辺の局所洗掘と粒度分布変化の再現性に対して、本解析モデルがどの程度の精度を有しているか確認するために行った計算ケースであり、今後の解析モデルの実用面を考えて標準型 $k-\varepsilon$ モデルを用いて検証を行っている。

▼5.5.2 計算結果と考察

（１）河床形状の再現性

Fig. 5.49 には非越流型水制 B1 ケースの計算開始から 3 時間後の河床変動計算結果と同時刻の実験結果の比較を示す。Fig. 5.49 の (a) には実験結果、(b), (c) には非平衡流砂モデルを用いた渦粘性モデルの異なる 2 つのモデルの計算結果をそれぞれ示している。そして、Fig. 5.49 (d) には平衡流砂モデルと線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いて得られた河床変動計算結果を示す。

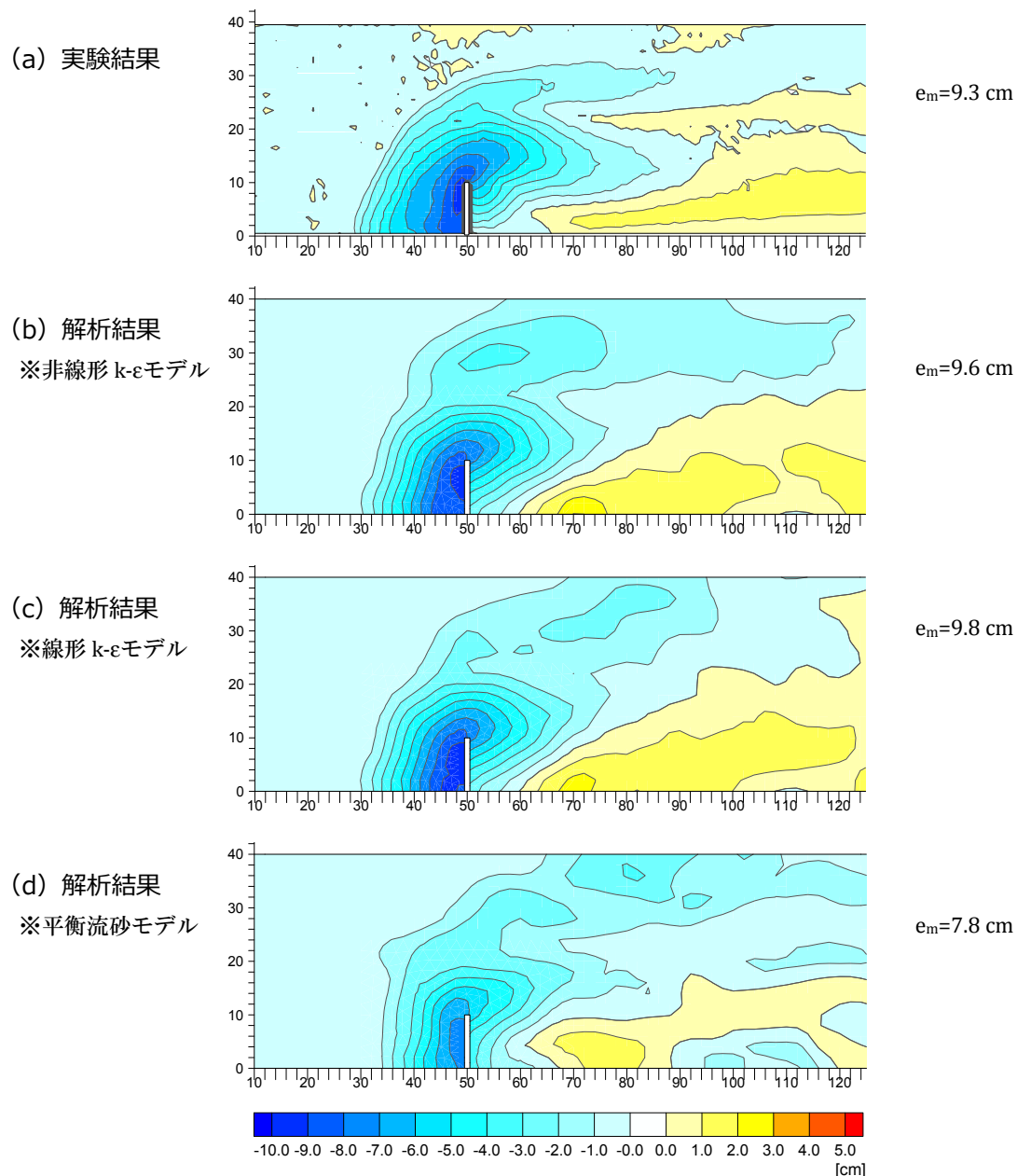


Fig. 5.49 河床変動結果の比較 (Case B1:非越流, M-NSCS)

最も洗掘深が大きくなる箇所は、計算と実験共に水制前面に位置し、最大洗掘深(e_m)は実験が 9.3cm、非平衡流砂モデルの計算結果が非線形モデルで 9.6cm、線形モデルで 9.8cm となっており、両渦粘性モデル共に実験に非常に近い結果が得られている。平衡流砂モデルでは最大洗掘深 7.8cm と 1.5 割程度小さく計算されている。水制近傍の洗掘形状については、水制前面と頭部近傍で洗掘が特に大きく、各ケースで水制近くの洗掘域の平面的な傾向は概ね再現できることが確認できた。そして、非平衡流砂モデルを用いた計算において、渦粘性モデルの違いで洗掘孔形状結果に大きな違いは生じないことが確認された。平衡流砂モデルによる計算結果のみ洗掘孔形状が若干異なり、洗掘孔の大きさが他ケースに比べて若干小さく、特に水制上流側

への洗掘拡大が小さく、洗掘孔の輪郭については非平衡流砂モデルの方が実験結果により近い。ただし、どの計算ケースの計算結果において共通することだが、水制頭部から下流に向けて縦断方向に伸びる洗掘域の長さが計算値の方が若干短い傾向となっている。この点については、前節の流れ計算で確認された水制頭部域での下降流が過小評価されていることがその縦断方向の洗掘域長さの再現性に影響していると考えられる。また、Fig. 5.46 に示すように渦粘性モデルの違いで水制頭部の下降流に大きな差が見られなかったため、縦断方向の洗掘孔形状で2つの解析結果の差が然程生じなかったと考えられる。

また、堆積域については、水制背後の側壁近傍に主に土砂が堆積し、非平衡流砂モデルの計算結果においては実験結果と同程度の高さで堆積し、概ね実験結果を再現できている。平衡流砂モデルの計算結果については、水制背後の堆積量が非平衡流砂モデルに比べて少なく、水制背後域の堆積域は非平衡流砂モデルの方が良好に再現できることが示された。

次に、河床高結果の経時変化に着目する。Fig. 5.50 には非線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた非平衡流砂モデルケースの河床高結果の経時変化を示す。実現現象と同様に水制先端で洗掘が始まり、その後、水制先端の洗掘域が水制上流側で側壁まで達した後に、上流へと洗掘孔が拡大している様子が確認できる。この洗掘孔の拡大過程は、実験中に上空から撮影したインターバル撮影画像 (Fig. 3.19) と比べると、洗掘孔拡大の形状変化は良く計算で良く捉えられていることが確認できる。ただし、洗掘の初期ステージにおいて計算結果の方が若干洗掘孔の拡大が遅い傾向が確認できる。これは初期の水制先端において砂粒が巻き上がる程の活発な砂粒の移動現象を滑動形式でモデル化した掃流砂モデルでは、実現現象に比べて洗掘の進行が遅くなることが考えられる。この活発な移動現象を考慮するためには、さらに浮遊砂のモデル化や小跳躍 (saltation) のような砂の活発な移動現象を再現する必要があると考えられる。

堆積域の経時変化については、まずは側壁から離れた水制頭部の下流域に堆積が進行し、洗掘がある程度進んだ後に、側壁近く水制背後域へも堆積が進行し堆積域が縦断方向に延伸している。河床形状の経時変化まで本実験では計測できていないため詳細な比較検証はできないが、上空からの撮影画像や目視による確認から概ね実現現象を再現できていると言えそうである。Fig. 5.51 には線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いた非平衡流砂モデル、Fig. 5.52 には平衡流砂モデルの河床高計算結果の経時変化を示す。非平衡流砂モデルを用いた解析結果において、線形と非線形モデルを比較しても洗掘孔の時間スケールや洗掘形状に大きな差はなく、洗掘形状のみの予測ならば計算時間の面を考慮して、線形 $k-\varepsilon$ モデルを用いて計算する方が工学的な観点から有利だと言えそうである。また、平衡および非平衡流砂モデルの河床高の経時変化比較より、平衡流砂モデルは非平衡流砂モデルに比べ、水制近傍の初期の洗掘速度が速く、そのため洗掘した土砂により下流に早く堆積域が形成されてる。そして、その下流に堆積した土砂は平衡流砂モデルの方が速く下流に輸送されている様子が図より確認できる。平衡流砂モデルは非平衡流砂モデルに比べ初期の洗掘速度は速いが、途中で洗掘の進行が遅くなっていることが図より確認できる。これは後に示す粒度分布の影響が影響していると考えられ、平衡流砂モデルの方が移動速度無限大モデルであることから洗掘孔底部の粗粒化の進行が早くアーマ・コートが早く形成され洗掘が抑えられたと考えられる。

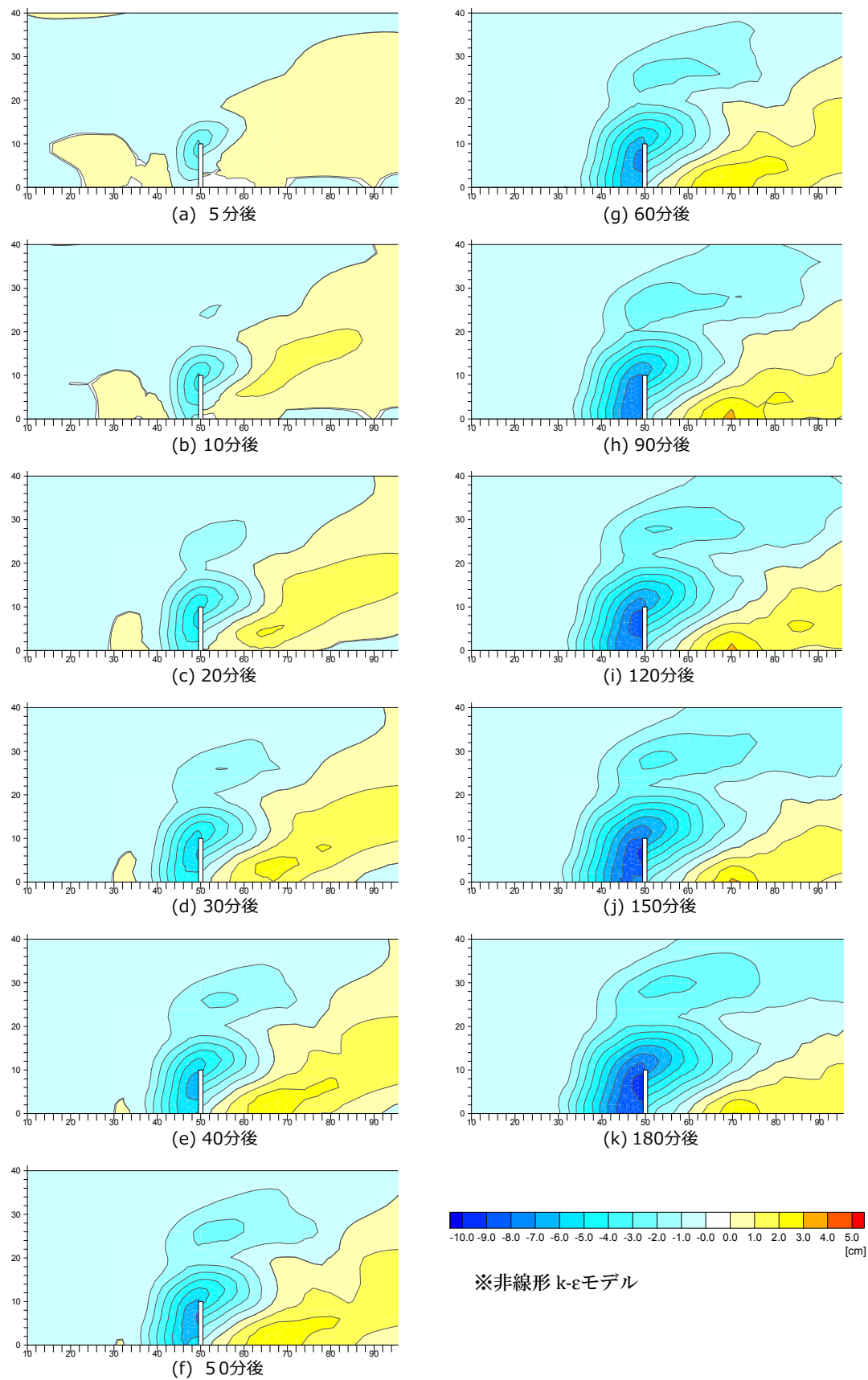


Fig. 5.50 河床変動高の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 非線形モデル)

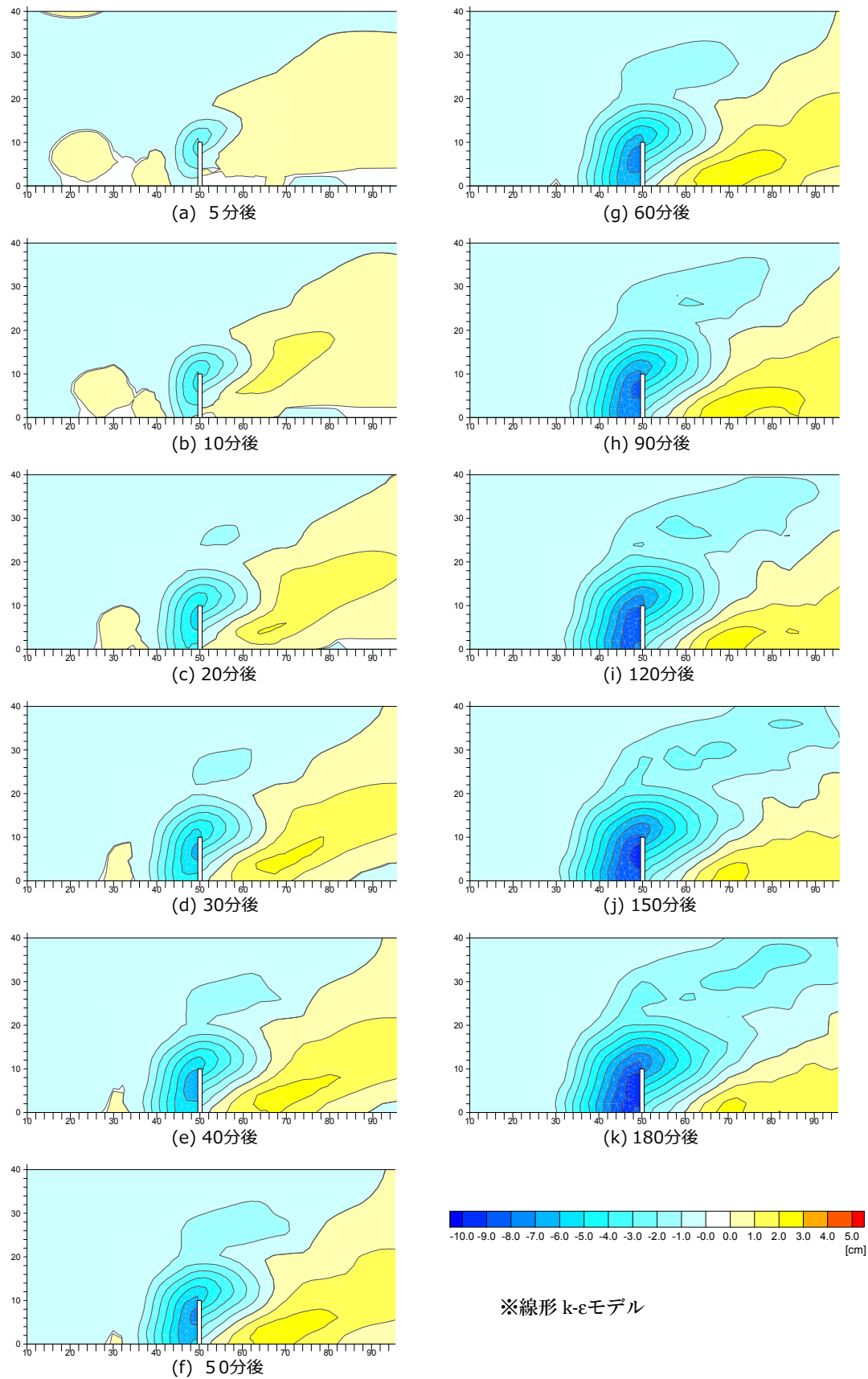


Fig. 5.51 河床変動高の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 線形モデル)

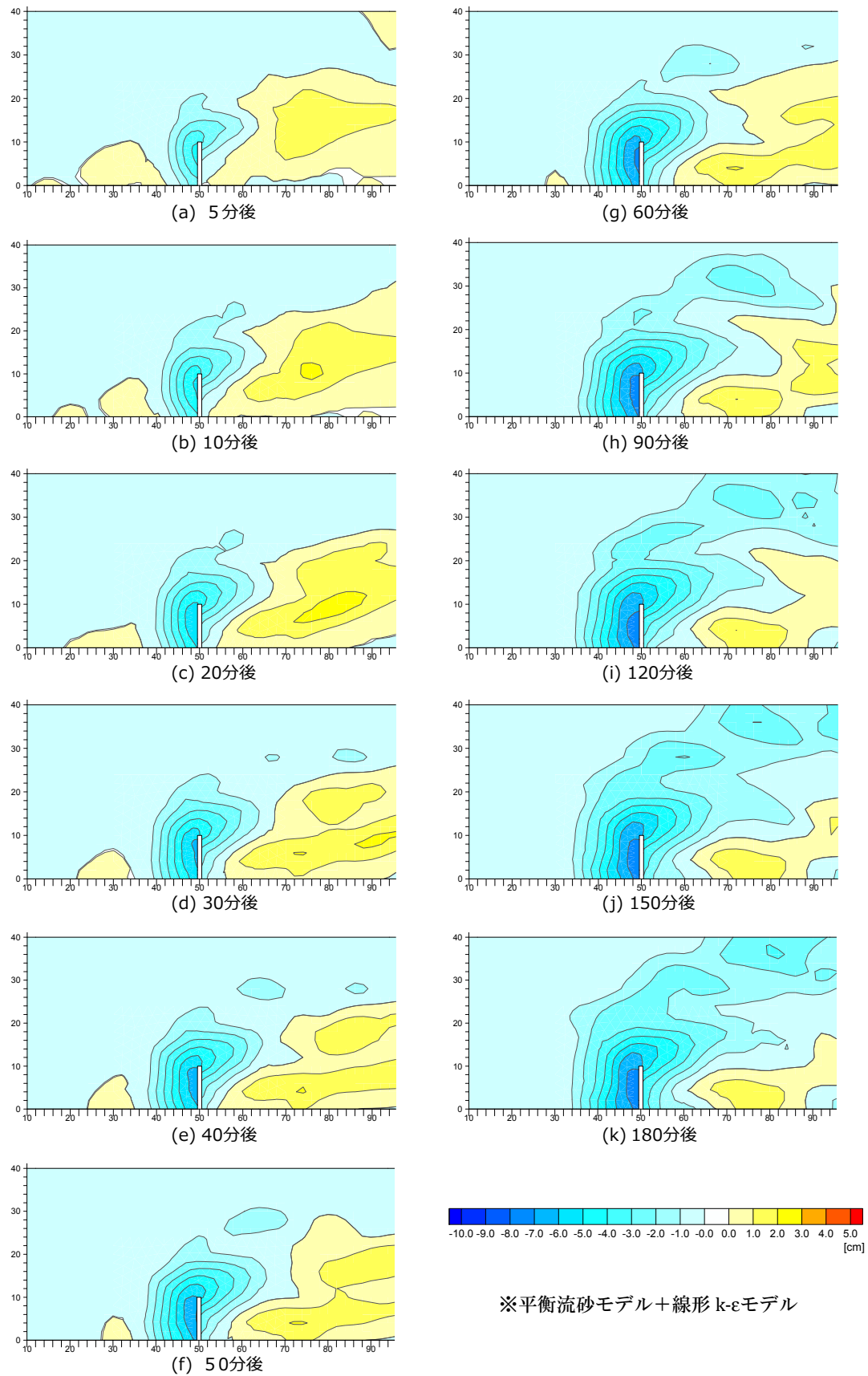


Fig. 5.52 河床変動高の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 平衡流砂モデル)

(2) 水制近傍の掃流力の時間変化

Fig. 5.53, Fig. 5.54 には非平衡流砂モデルを用いた非線形および線形 $k-\varepsilon$ モデルの摩擦速度コンターと底面流速ベクトル解析結果の経時変化を示す。図に示す通り、洗掘初期過程においては、水制先端とその下流域において摩擦速度の大きな領域が形成される。その摩擦速度の大きな領域については、水制先端の河床洗掘が進むことによって、水制先端から下流にかけて左岸側と水制背後への右岸側へ分けられるような流れが生じ、その流れは洗掘初期から平衡に近い河床状態まで維持されることが図より確認できる。水制先端の洗掘が進行し、その洗掘された土砂がその下流に堆積し、その堆積した土砂が徐々に下流へ輸送されるにつれて、摩擦速度の大きな範囲も水制先端から下流にかけて延伸している様子が確認できる。また、水制前面域においては、洗掘孔拡大に伴って馬蹄形渦によって河床近傍で上流へ向かう逆流域が徐々に上流へ拡大している様子が確認できる。最終的には、水制前面と水制頭部、そして水制頭部から下流に伸びる縦断領域において摩擦速度が相対的に大きな領域が維持され、これは河床表層の粗粒化領域と一致していることが確認できる。また、実験で水路中央近くの洗掘孔縁近くに縦断方向に伸びる帯状細粒化域が形成された領域において、摩擦速度（掃流力）が局所的に弱くなる細長い縦断領域が、時間の進行とともに徐々に形成されていることが解析結果から確認できる。実験において帯状の細粒化領域が実験開始後からある程度時間が経ってから形成されていたことを考えると、この摩擦速度が局所的に弱くなる縦断領域の形成によって細粒分が下流へ輸送されにくくなり、帯状細粒化領域の形成と維持に大きく影響を及ぼしたと考えられる。摩擦速度が局所的に弱くなる縦断領域の形成の原因については、先述したように馬蹄形渦により流れが幾分上向きとなるため、その上昇流の時間変化を把握するために鉛直流速の水深平均値の経時変化を Fig. 5.55 に示す。図から確認できるように、洗掘孔縁の若干内側において馬蹄形渦の上昇流発生領域が洗掘孔の拡大につれて目立つようになり、洗掘孔がある程度発達した時期からその馬蹄形渦の上昇流領域が水制設置位置から下流にむけて縦断方向に伸びている様子が確認できる。

Fig. 5.53 と Fig. 5.54 の摩擦速度の解析結果の比較により、渦粘性モデルの違いで摩擦速度と底面近傍流速ベクトルに大きな差はないことが確認できる。ただし、局所的に少し値が異なる部分も見られ、上述した局所的に摩擦速度が弱くなる縦断領域において、非線形モデルの方がその摩擦速度低減域が形成されるのが時間的に早く、その低減の程度も非線形モデルの方が大きいことが確認できる。その原因としては、やはり渦粘性モデルの違いによって馬蹄形渦の上向き流れの大きさに違いが生じたことが考えられ、Fig. 5.55 と Fig. 5.56 に示す鉛直流速の水深平均値で確認できるように、摩擦速度が低減する縦断領域で非線形モデルの方が上昇流が大きく、その上昇流が卓越する領域が縦断方向に長く形成されていることが確認できる。

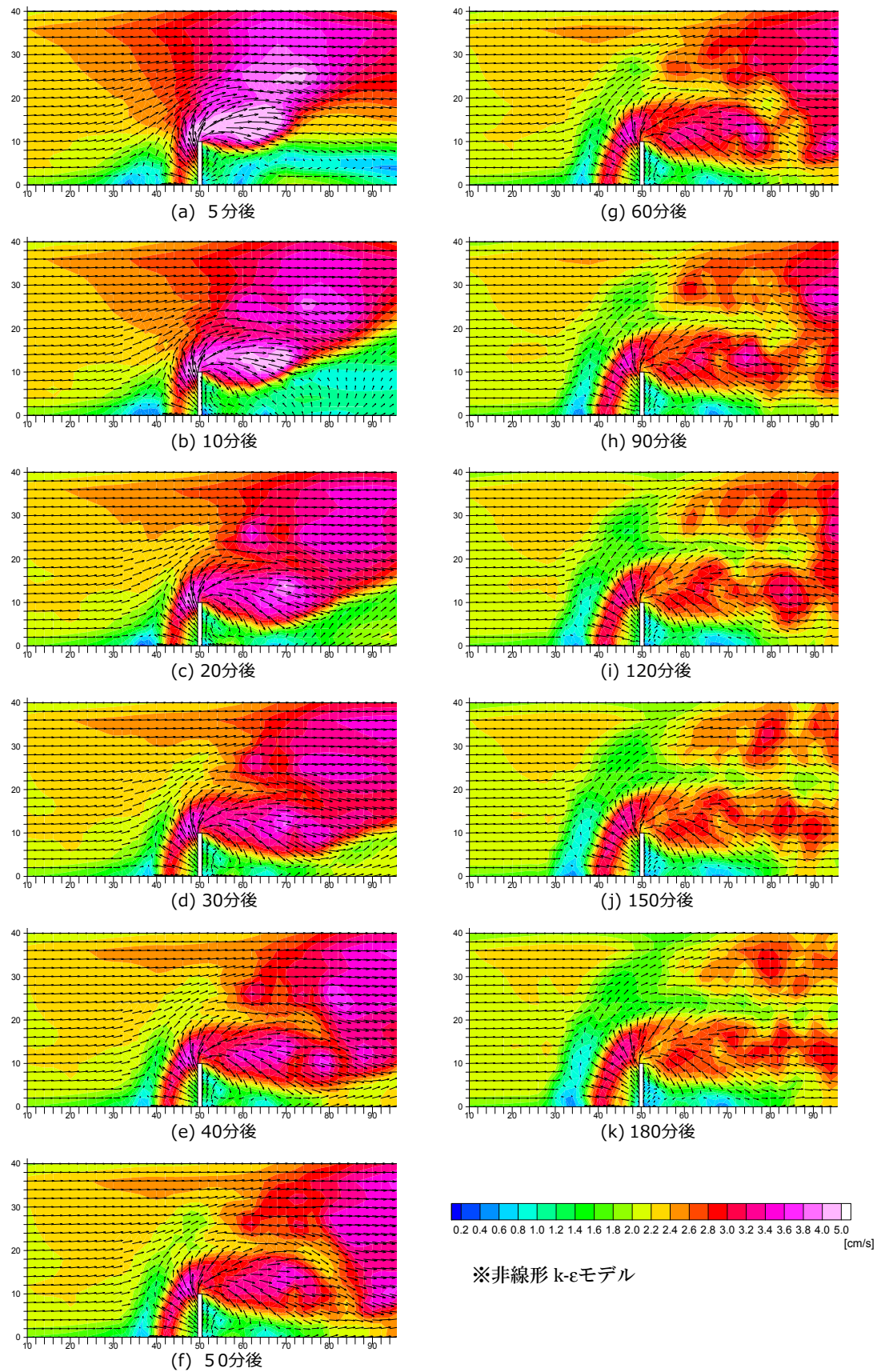


Fig. 5.53 摩擦速度と底面流速ベクトルの経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS)

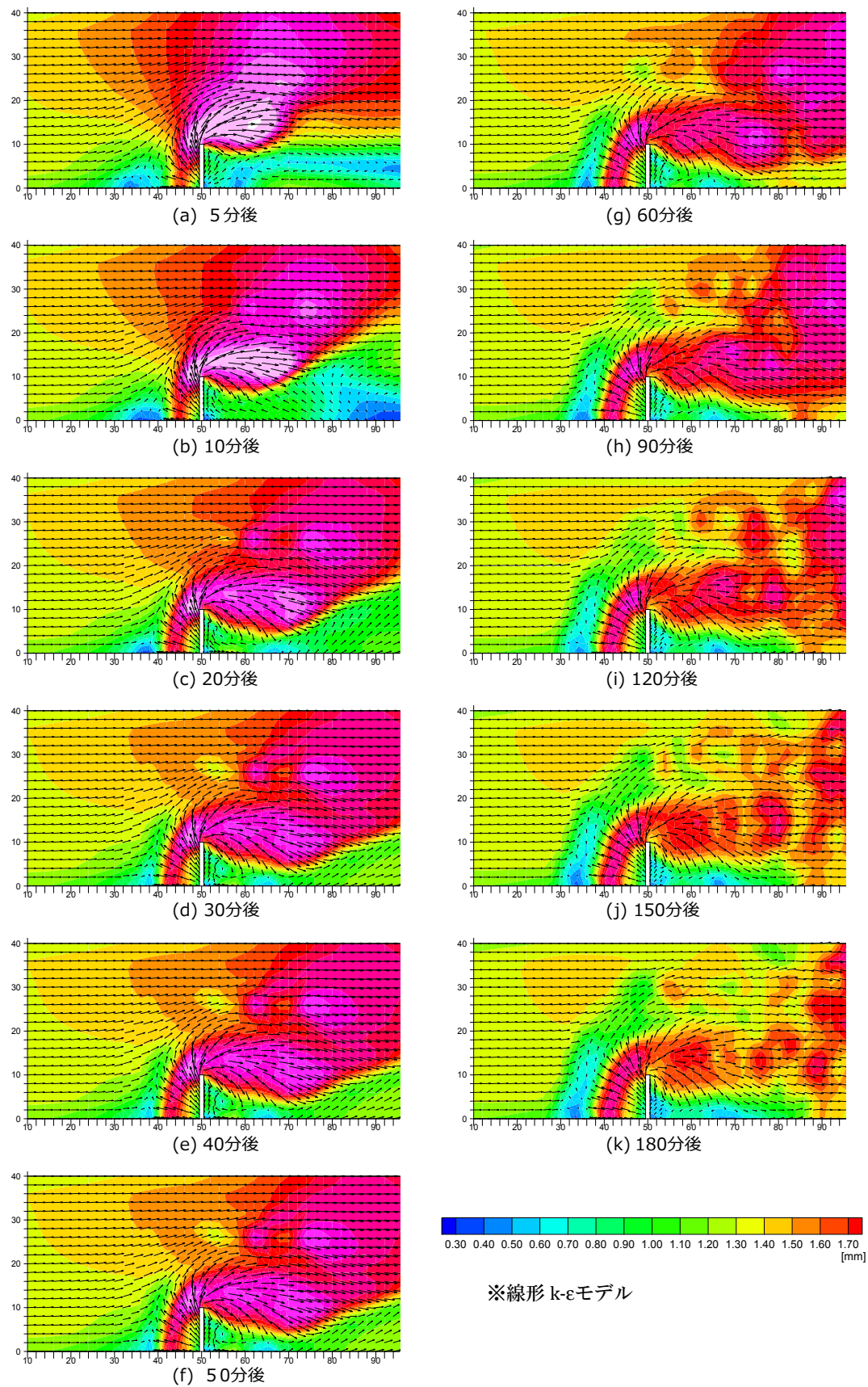


Fig. 5.54 摩擦速度と底面流速ベクトルの経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS)

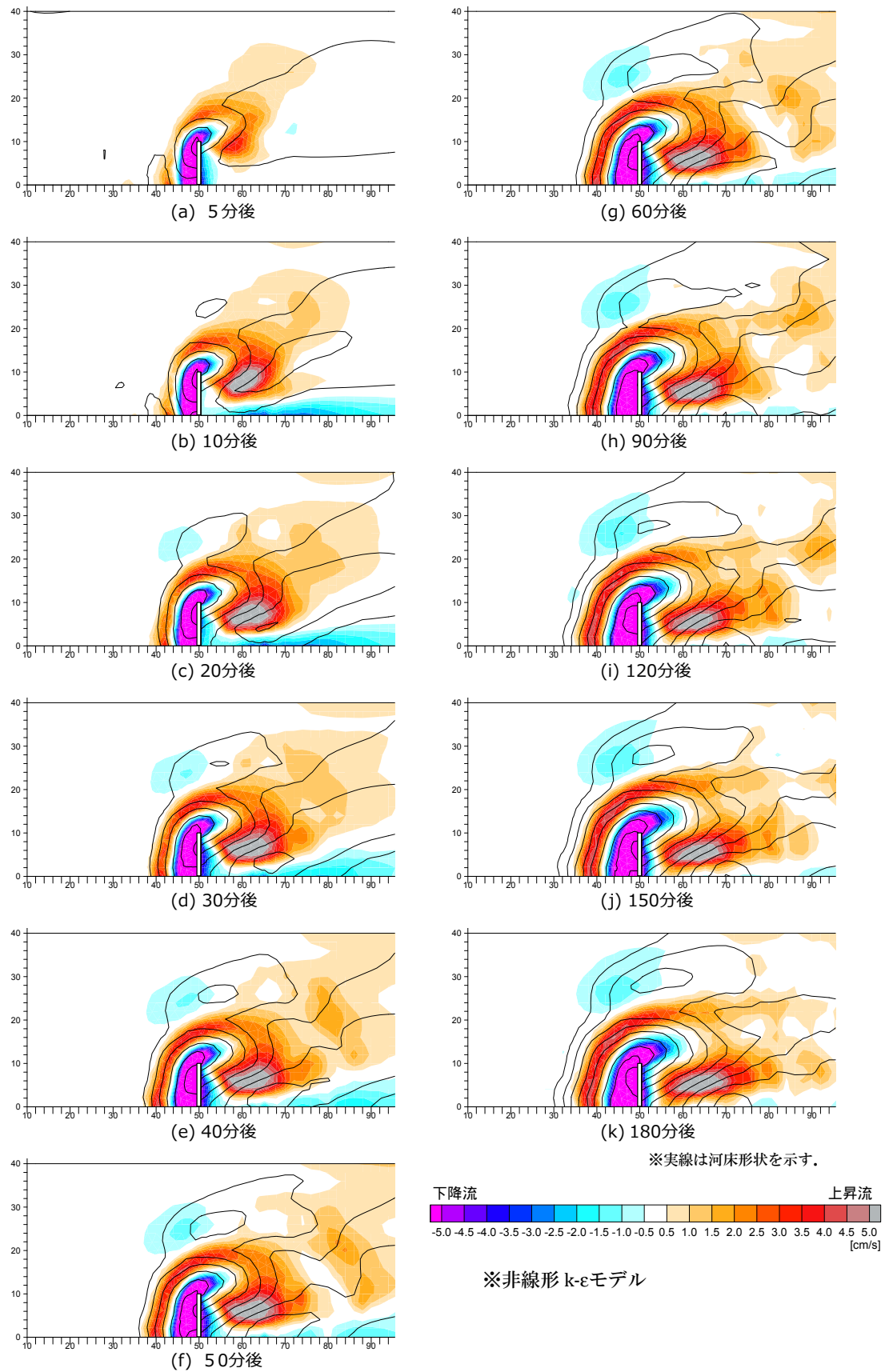


Fig. 5.55 鉛直流速（水深平均）の経時変化（Case B1:非越流，M-NSCS，非線形モデル）

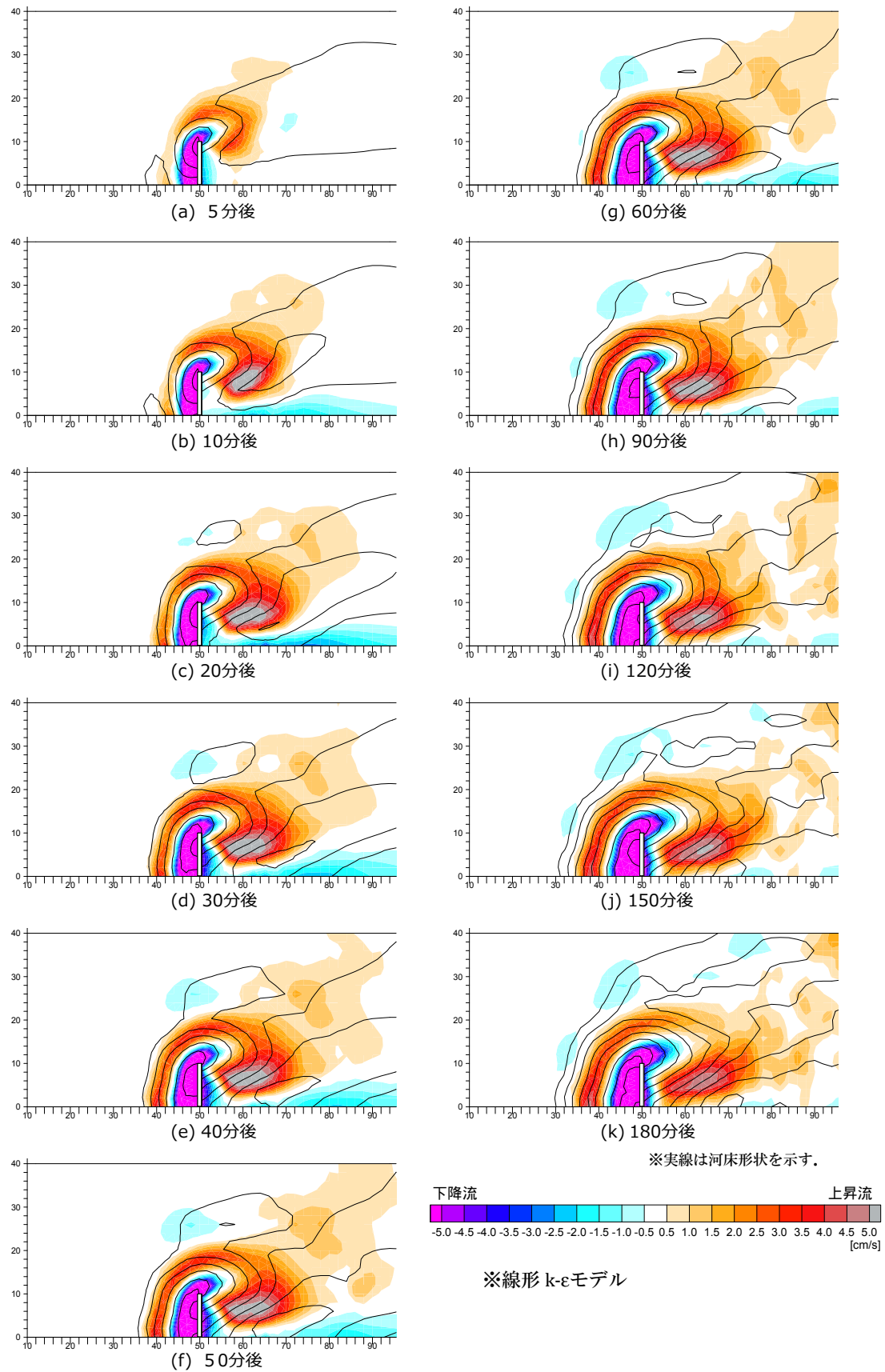


Fig. 5.56 鉛直流速（水深平均）の経時変化（Case B1:非越流，M-NSCS，線形モデル）

(3) 水制背後平面渦の変化

平坦河床上の流れの非越流型水制背後には、既往の研究で知られているように平面渦が存在し、本研究の実験においても平面渦が計測されている (Fig. 3.35, Fig. 3.36)。そして、洗掘が進行し、平衡状態に近い洗掘河床上の流れにおいてはその水制背後の平面渦は存在せず、水平方向に軸を持つ縦渦が水制背後に存在するようになる (Fig. 3.39)。その渦構造の時間変化を実験による流れ場の計測によって把握することは、河床洗掘初期過程では河床の地形変化が激しく、変化の時間スケールが小さいため難しいと考えられる。ここでは、本研究で構築した数値解析モデルを用いてその計算結果より、水制背後の平面渦の変化過程を確認することを行った。Fig. 5.57 には洗掘初期過程である実験開始から 1 分後から 10 分後までの 1 分間隔の河床地形と底面近傍流れの流線図を示す。

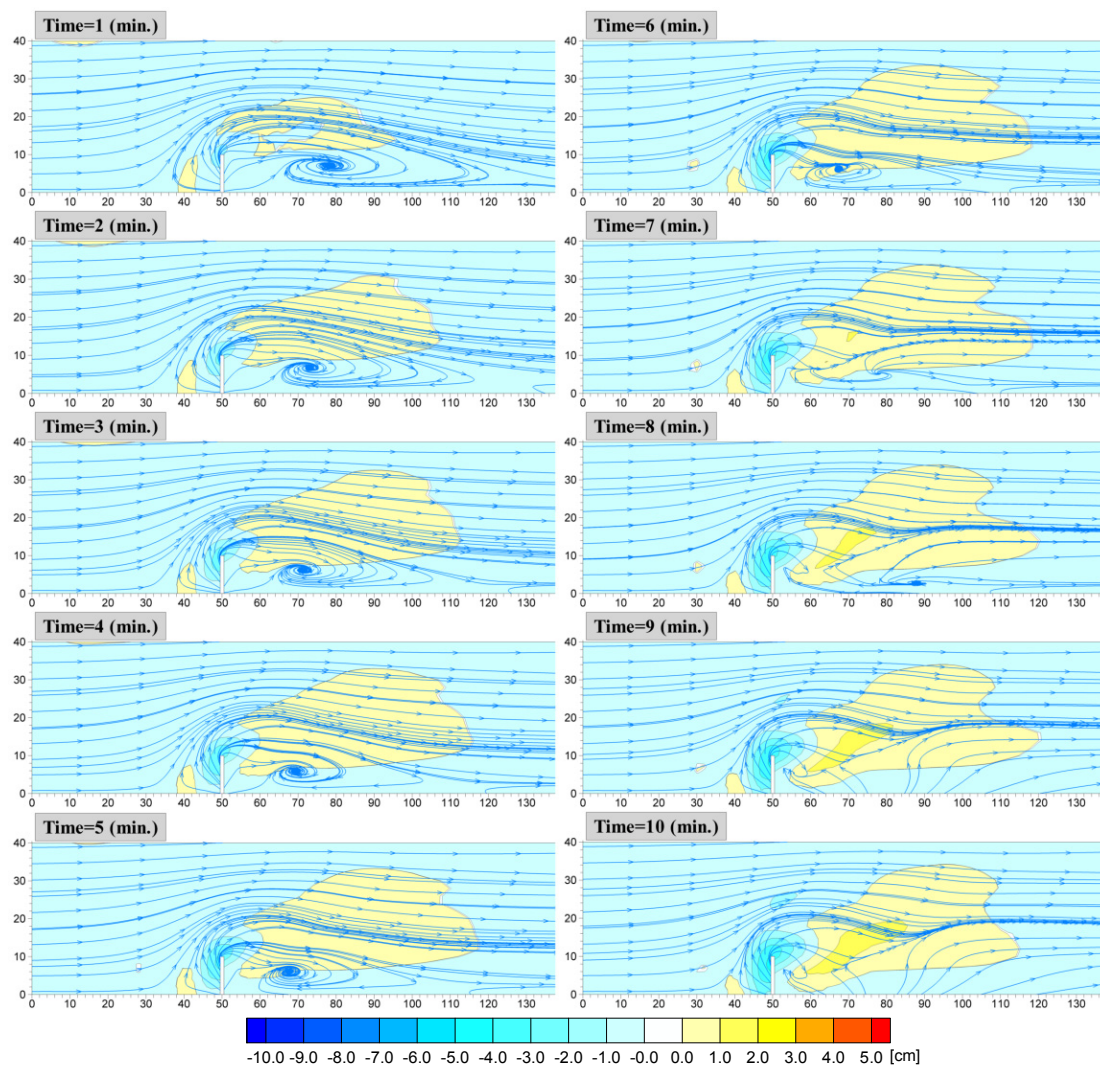


Fig. 5.57 河床地形と底面流れの変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 非線形モデル)

Fig. 5.57 に示されるように、計算初期には水制背後に平面渦が存在しているが、水制先端近傍の河床洗掘の進行と下流側に形成された洗掘土砂の堆積域によって、水制先端から水制背後域へ向かう流れの曲率半径が徐々に小さくなり、平面渦の中心が徐々に水制に近づいている様子が確認できる。流れの右岸側壁への再付着点(reattachment point)についても平面渦の中心が上流側へ移動することによって水制側に近づいている。実験開始から7分後程度の洗掘初期過程でその平面渦構造が崩れており、本解析結果より水制先端近傍の洗掘とその堆積土砂が水制背後域へある程度進行することによって水制背後の平面渦構造が崩壊していることが確認できる。水制先端近傍の河床洗掘によって、水制先端近傍から水制背後へ向かう流れの曲率半径が小さくなり、また河床洗掘と直下流の土砂堆積により、水制先端から水制背後へ向かう流れが河床形状に沿って上昇流れへと変化する。そして、その上昇流れが水制背後域の縦渦の形成を促すため、初期に存在した平面渦構造が崩壊される結果となっている。

河岸侵食対策のために流れの再付着点を予測することは重要であるが、本解析結果で示されたように、水制背後の平面渦構造は水制先端の河床洗掘と水制頭部下流及び水制背後域の土砂堆積により流れ場が大きく変化し再付着点の位置も異なってくるため、河床形状の予測も合わせて評価を行うことが重要である。

(4) 河床表層の粒度変化の再現性

Fig. 5.58 には通水3時間後の河床表層の平均粒径計算結果と実験結果の比較を示す。解析モデルによる河床表層粒度の再現性については、水制前面域と水制頭部から下流にかけた縦断領域で大きく粗粒化する特徴的な粒度分布変化を非平衡流砂モデルにて良好に実験結果を再現できている。また、水制背後域に細粒化領域が形成され、後流渦によって水制背後に細粒分が多く輸送された現象も計算結果において良好に再現できている。さらに、洗掘孔縁の若干内側では洗掘孔底部に比べ細粒化する領域が形成され、水路中央近くで縦断方向に伸びる帯状細粒化領域(サンドリボン)についても本解析モデルで良好に再現できている。

線形および非線形の渦粘性モデルの違いによる河床表層粒度分布結果への影響は、水制頭部から下流に伸びる粗粒化領域の横断幅に若干の差が見られ、Fig. 5.58 に示されるように非線形モデルの方が横断方向の幅が広く実験結果と近い。これは、前節で示した馬蹄形渦流れの再現性の違いが影響し、Fig. 5.45 で示されたように水制頭部域やその下流において河床近傍の横断方向流れが線形モデルでは非線形モデルに比べ若干弱くなる傾向があるため、横断方向の分級の程度に影響を及ぼし、縦断方向に伸びる粗粒化領域の幅が非線形モデルに比べ線形モデルの方が小さくなったと考えられる。そして、その分級の影響と前述した摩擦速度の低減域の影響が水路中央近くの細粒化領域の縦断方向の長さに影響を及ぼし、非線形モデルの結果の方がその細粒化領域が縦断方向に長く形成されており、その全体的な細粒化の程度も非線形モデルの方が大きいことが計算結果より見て取れる。

平衡および非平衡流砂モデルの河床表層粒度分布結果の比較から、水制前面と水制頭部近傍において粗粒化し、洗掘孔の縁近傍で細粒化する傾向は平衡流砂モデルでも再現されているが、その細粒化と粗粒化の程度が非平衡流砂モデルに比べて大きいことが結果より確認できる。そして、平衡流砂モデルでは、水制頭部から下流に伸びる粗粒化縦断領域の再現性が非平衡流砂モデルに比べて悪く、砂粒の運動方程式を用いて流れと河床の局所勾配と砂粒自身の重力の影響を考慮しながら砂粒の移動経路を解くような非平衡流砂モデルによって、水制周辺の粒度分布がより良好に再現できることが示された。

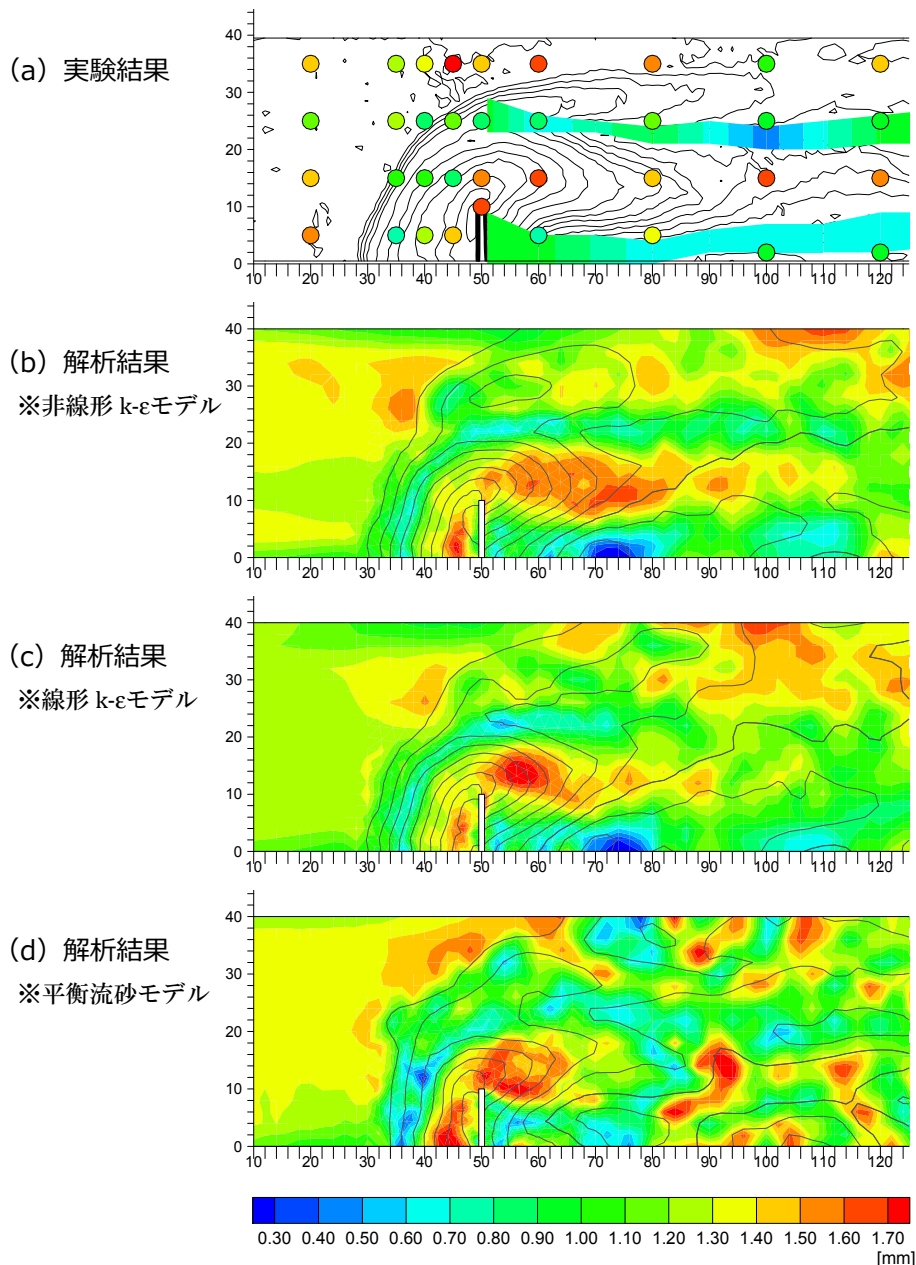


Fig. 5.58 平均粒径結果の比較 (Case B1:非越流, M-NSCS)

Fig. 5.59 と Fig. 5.60 には非平衡流砂モデルと非線形および線形 $k-\varepsilon$ モデルによって計算された河床表層（交換層）の平均粒径結果の経時変化を示す。洗掘初期過程から徐々に水制先端から下流に伸びた縦断範囲において粗粒化域が形成され、時間の進展とともに下流へ延伸し、幅も拡大している様子が見て取れる。水制前面においては水制頭部とその下流領域に比べて粗粒化の程度は弱いが、馬蹄形渦による洗掘孔拡大に伴って粗粒化域の幅が上流側へ拡大している。そして、洗掘孔の縁近辺には常に細粒分が河床表層に多く存在する計算結果となっている。また水制から離れた主流路域においては粗粒化が徐々に進行し幅広い粗粒化域形成され、洗掘孔がある程度拡大した後に、その粗粒化域に洗掘孔の縁から細粒分が供給されている様子が見える。水制背後域については後流渦によって細粒分が輸送され、時間の進行とともに徐々に細粒化の度合いが進行していることが確認できる。線形と非線形モデルの結果で大きな差はなく、縦断方向の粗粒化領域や側壁近傍および水路中央側の細粒化領域も両渦粘性モデルで再現されている。ただし、先にも記述したように非線形モデルに比べて計算後半で粗粒化領域の幅が若干狭くなり、細粒化域もわずかだが細長く維持されていない傾向が確認できる。

Fig. 5.61 に平衡流砂モデルによる表層平均粒径結果の経時変化を示す。平衡および非平衡流砂モデルの河床表層粒度分布結果の比較より、平衡流砂モデルの方が河床表層の粗粒化の進行が早いことが確認できる。平衡流砂モデルは砂粒の移動速度に関係なく土砂を輸送する移動速度無限大モデルため、非平衡流砂モデルに比べて細粒分が速く下流に輸送されたと考えられる。そして、洗掘孔内においても粗粒化が早いためにアーマ・コートがより小さい洗掘深で形成され、最終の洗掘深が非平衡流砂モデルに比べて小さく計算されたと考えられる。また、細粒化帯状領域が非平衡流砂モデルに比べて細長く明確に形成されていないことが確認できる。これらの結果より、非平衡流砂モデルは平衡流砂モデルに比べて水制周辺の河床高および粒度分布のシミュレーションに有効であることが示された。水制周辺の流れ場は渦構造により底面流速ベクトルの変化が激しく、そして複雑な河床形状と大きな河床勾配を有しているために、砂粒の大きさや離脱地点によっても砂粒の移動経路が異なり、平衡流砂モデルのような離脱地点での流砂の移動方向を評価し瞬時に隣接メッシュに土砂を移動させるモデルでは良好に水制周辺の河床高と粒度分布を再現できないことが考えられる。

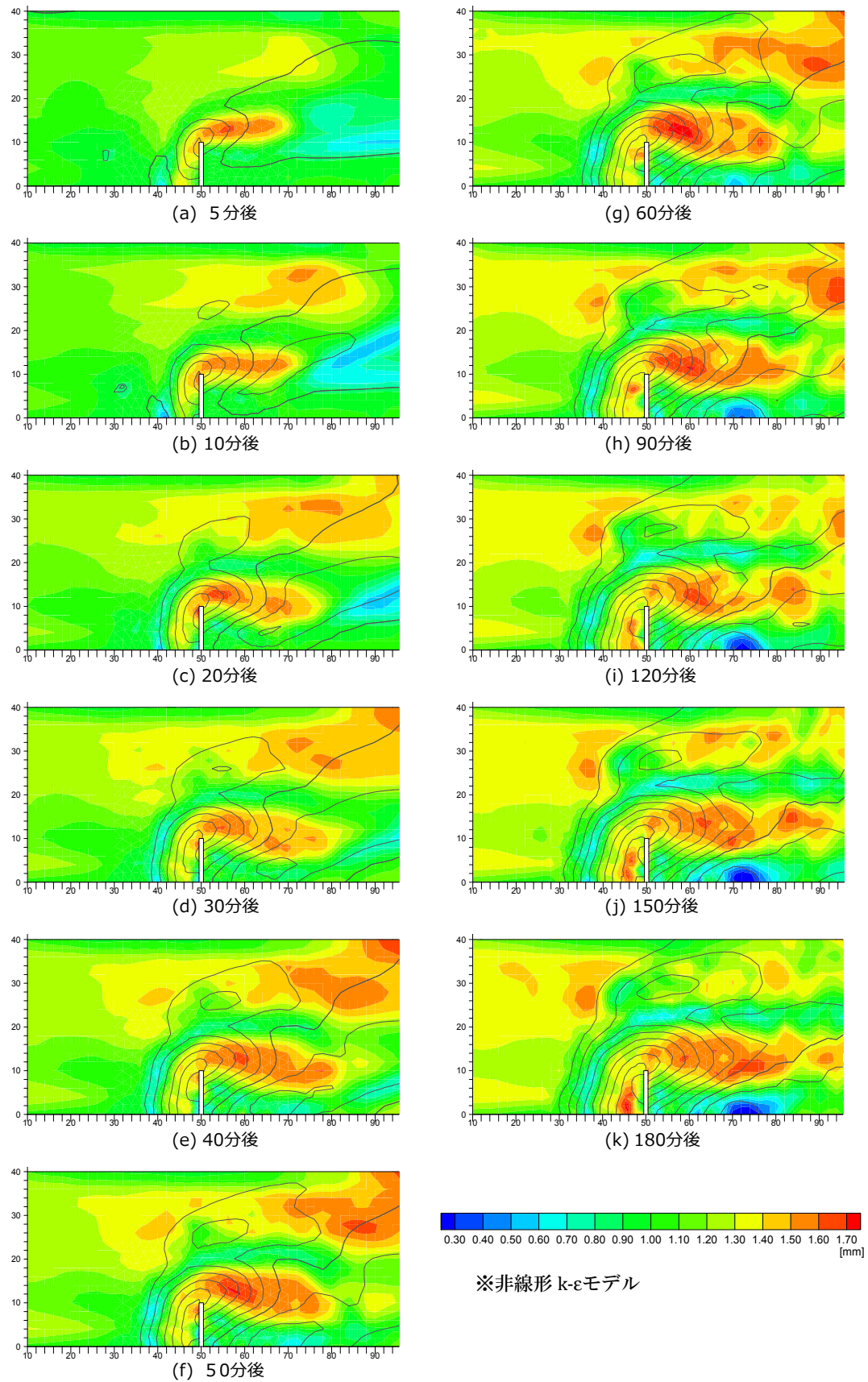


Fig. 5.59 表層平均粒径の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 非線形モデル)

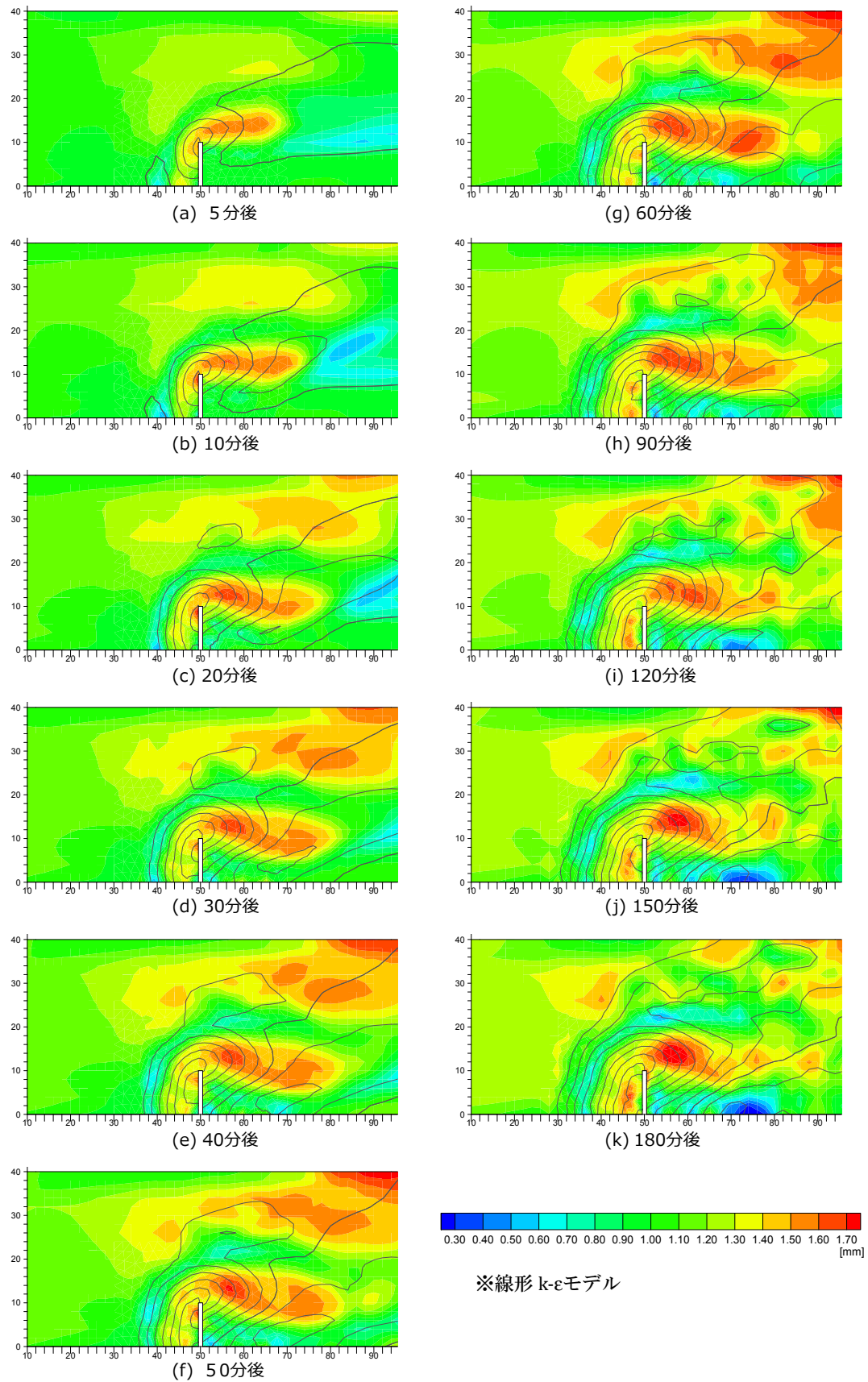


Fig. 5.60 表層平均粒径の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 線形モデル)

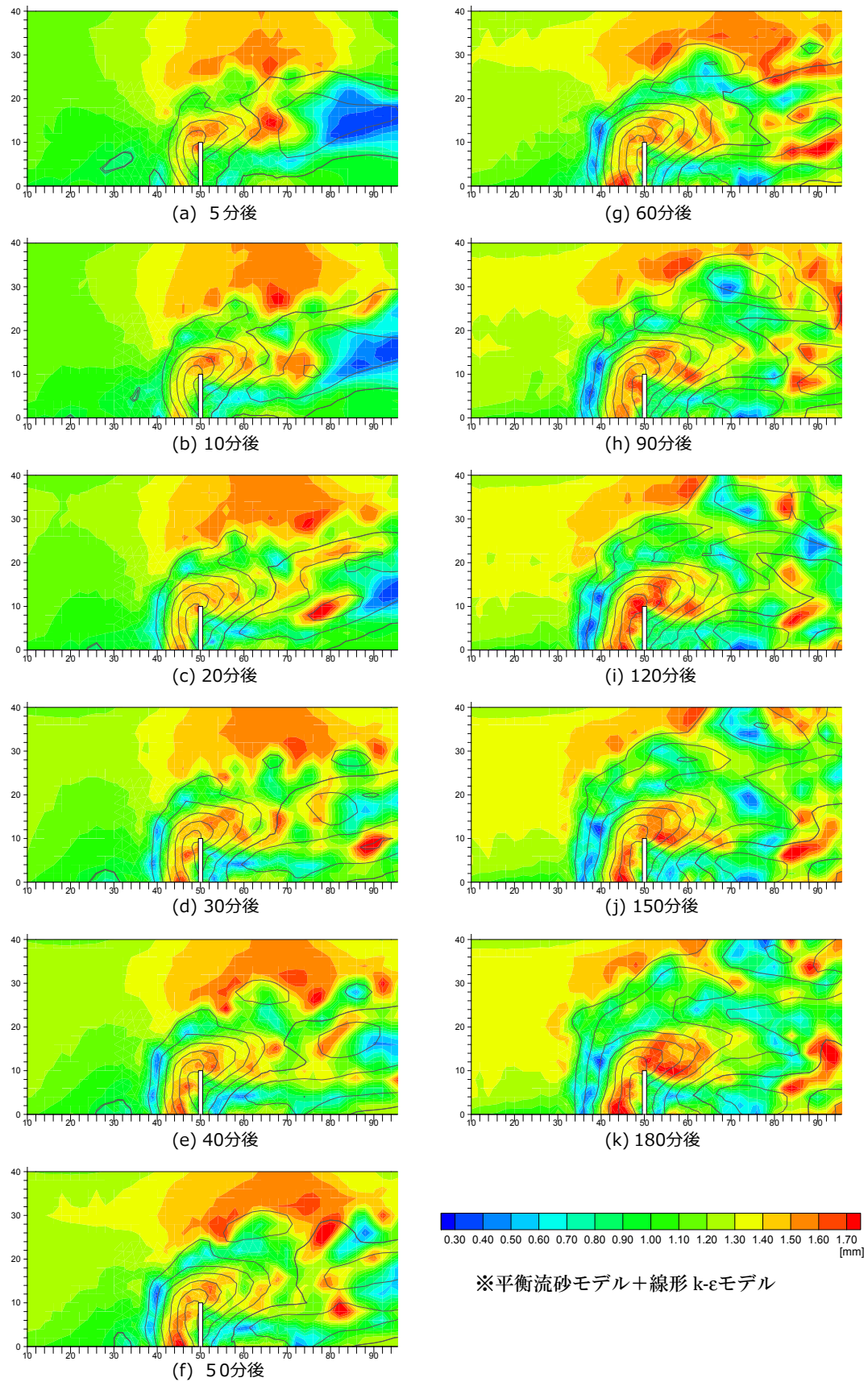


Fig. 5.61 表層平均粒径の経時変化 (Case B1:非越流, M-NSCS, 平衡流砂モデル)

(5) 越流型水制への適用

Fig. 5.62, Fig. 5.63 には越流状態である $S_h=4.0\text{cm}$ の B2 ケース, Fig. 5.64, Fig. 5.65 には $S_h=2.5\text{cm}$ の B3 ケースについて, それぞれ河床高および河床表層平均粒径の計算結果と実験結果を示す。水制高が低くなるとともに洗掘も軽減される傾向は計算においても再現できている。洗掘孔の大きさは実験と比べると解析結果が若干小さいものの, 最大洗掘深の大きさは良く再現できている。河床表層の粒度分布については, 非越流型水制の計算と同様に, 水制前面域と水制頭部から下流に伸びる粗粒化領域は計算で再現され, その横断幅についても水制が高い方が幅が広い傾向は計算でも同様である。そして, 水制背後の細粒化領域は形成され両越流ケースの計算で再現され, B2 ケースの左岸側の細粒化領域については, 計算された洗掘孔の大きさが若干小さいため, 実験と比べると若干右岸寄りの計算結果となっている。

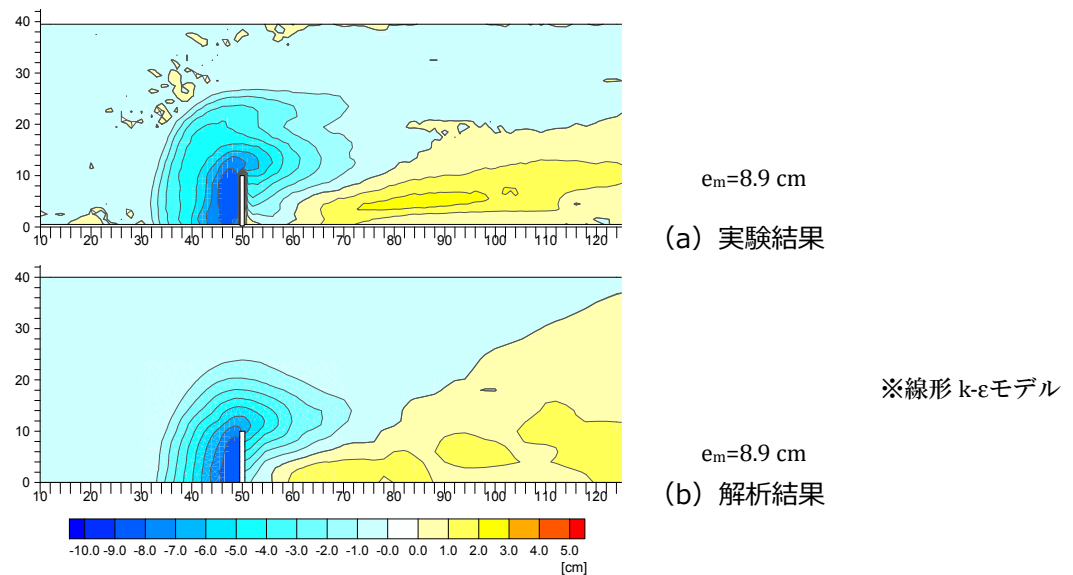


Fig. 5.62 河床変動結果の比較 (Case B2:越流, M-Sh4CS)

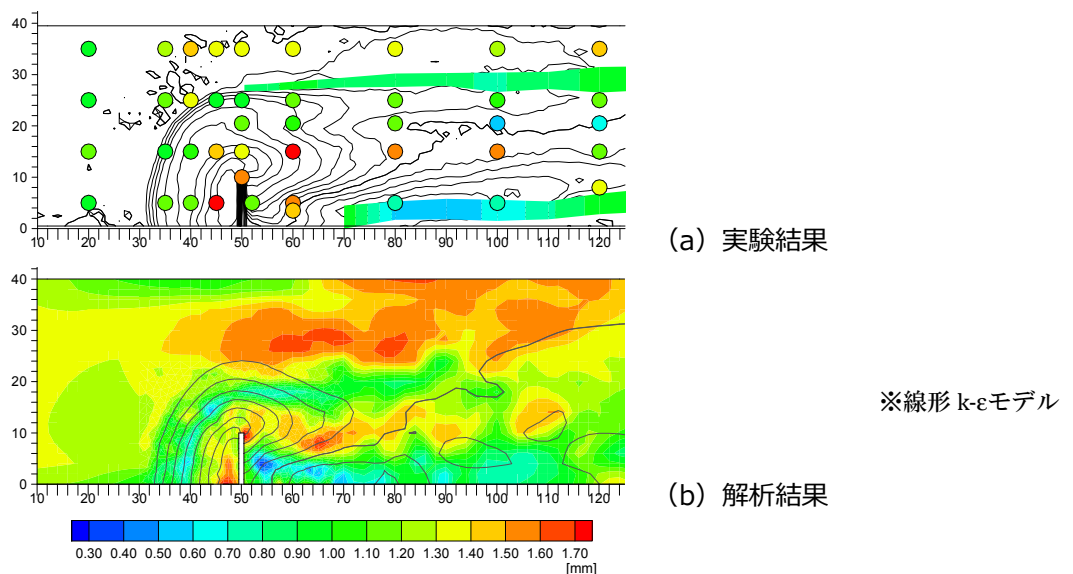


Fig. 5.63 平均粒径結果の比較 (Case B2:越流, M-Sh4CS)

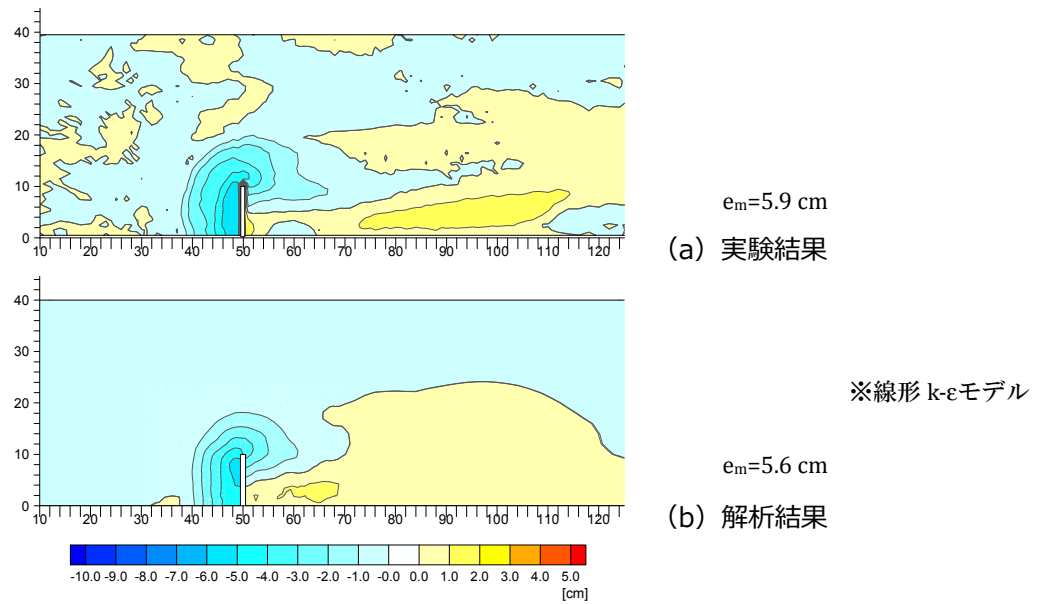


Fig. 5.64 河床変動結果の比較 (Case B3:越流, M-Sh2.5CS)

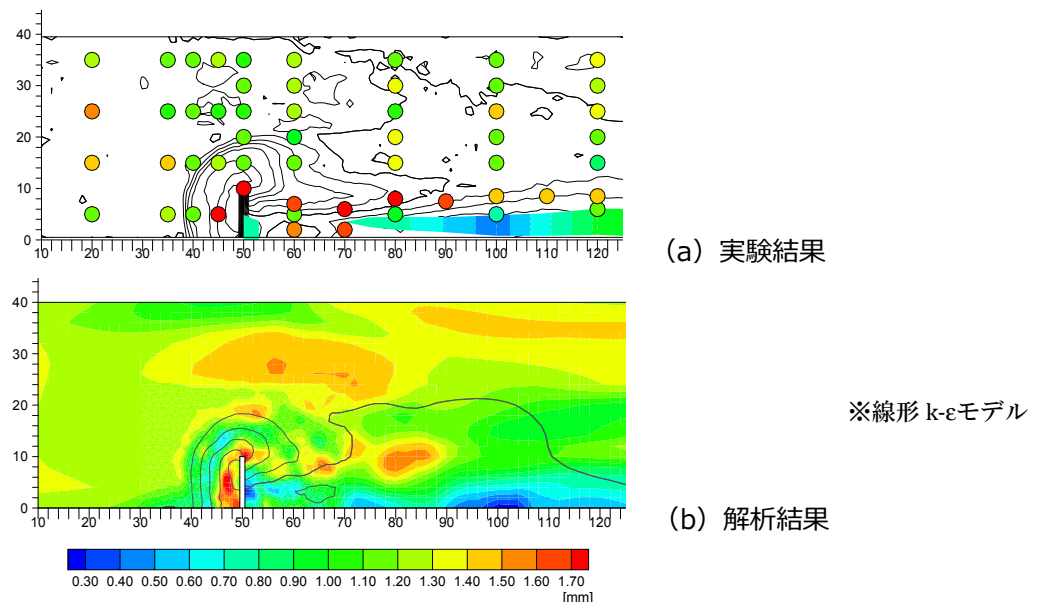


Fig. 5.65 平均粒径結果の比較 (Case B3:越流, M-Sh2.5CS)

5.6 まとめ

本章では、水制工設置による周辺河床の洗掘孔形状と粒度分布の変化を精度良く予測可能な数値解析モデルを構築することを目的として、水制周辺の流れの3次元性と流砂の非平衡性を配慮し、3次元流れのRANSモデルと混合粒径の非平衡流砂モデルを組み合わせた河床変動解析モデルの構築を行った。3章、4章で得られた移動床実験結果を検証材料に数値解析モデルの構築を図り、解析モデルで得られた計算結果の妥当性の検証および考察を行った。以下に本章の成果をまとめる。

まず、越流型および非越流型の流速場を計測した実験ケースについて、実験で形成された河床地形を用いて非線形 $k-\varepsilon$ モデルによる3次元流れ解析を行い、水制周辺の3次元流れ場の再現性について検証を行った。非越流型水制周辺の洗掘孔内に形成される顕著な馬蹄形渦、水制背後へ河床近傍で回り込む流れによって形成される後流渦、そして後流渦によって水制背後に形成される湧昇域と扇形の放射線状の表層流れ、さらには渦構造によって支配される底面近傍流れについても概ね良好な結果を示すことがわかった。越流型水制の流れ場については、後流渦は顕著に存在するが、計測で明らかとなった水制頭部から下流にかけた領域の馬蹄形渦が非越流時に比べて弱くなる傾向が計算においても再現され、底面近傍流れも良好な結果を示した。ただし、越流型および非越流型の水制頭部近傍において顕著な下降流が形成されるが、本解析モデルの計算結果は実験に比べ若干小さい傾向を示している。また、その下降流については馬蹄形渦の駆動力となるため、その渦による横断方向の底面流れについても計測結果に比べ小さい値を示すことが確認された。

また、計算時間の観点から河床変動計算を行う際には、渦粘性モデルに標準型 $k-\varepsilon$ モデルの線形渦粘性モデルを用いることが実用的であるため、非越流型水制の洗掘河床の流れ場について、線形と非線形の両渦粘性モデルによる流れのシミュレーションを行い、渦粘性モデルの違いによる流れ場の再現性の違いについて確認を行った。線形モデルでは、乱れエネルギーの過剰生成による渦粘性係数の過大評価により、水制頭部域の馬蹄形渦が顕著に表れず、水制頭部とその下流域において横断方向の底面流速については、線形モデルの方が小さく計算される傾向が示された。また、馬蹄形渦により流れが上向きになり底面近傍流速が低減される洗掘孔縁近傍の縦断領域において、線形モデルでは馬蹄形渦による上向き流れが弱まり、底面近傍流速が低減される程度が非線形モデルに比べ弱まることが示された。ただし、線形渦粘性モデルによる解析結果は、非線形モデルに比べ局所的な部分で再現精度が劣ることが確認されたが、全体的な流れの向きやその大きさについては非線形モデルと同様に概ね良好な精度を有していることが示された。

河床変動計算については、非越流と2つの越流状態の合計3ケースの混合砂河床の移動床実験について再現計算を行った。まず、非越流型水制のケースについて、非線形 $k-\varepsilon$ モデル及び線形 $k-\varepsilon$ モデル（標準型）の両渦粘性モデルによる計算を行い、混合砂の非平衡流砂モデルを導入した解析モデルの妥当性を検証した。水制周辺の洗掘孔については若干小さめに計算され

るが、最大洗掘深および洗掘孔形状については、両渦粘性モデルで良好に再現できることが示された。また、線形 $k-\epsilon$ モデルと平衡流砂モデルにより同様の計算を行い、非平衡流砂モデルの計算結果との比較により、両モデルによって計算される洗掘孔形状が若干異なり、洗掘深および洗掘孔が平衡流砂モデルの方が小さく計算されることが示された。これは混合砂河床の計算において、移動速度無限大モデルである平衡流砂モデルの方が粗粒化の進行が早く、洗掘孔底部でアーマ・コートが早く形成され洗掘が軽減されたと考えられる。また、実験で形成された洗掘河床上の流れ場の検証計算より、本研究の3次元流れ解析モデルでは水制頭部から下流域において下降流が過小評価される傾向が確認され、その影響からどのケースの河床変動計算においても、水制頭部から下流に伸びる洗掘域が実験に比べて若干小さく計算されている。

また、河床表層の粒度分布の計算については、水制前面、水制頭部から下流の縦断方向に伸びる粗粒化領域、そして、その粗粒化領域を挟むようにして存在する2つの細粒化領域についても非平衡流砂モデルで良好に再現された。線形および非線形の渦粘性モデルの違いによって、水制頭部の河床近傍横断方向流れの大きさが若干異なり、線形モデルの方がその流速が弱くなる傾向が示され、その河床近傍の横断方向流れの再現性の違いが、水制頭部近傍で生じる横断方向の分級に影響を及ぼし、縦断方向に伸びる粗粒化領域の幅が非線形モデルに比べ線形モデルの方が幾分小さくなることや、水路中央近くの細粒化領域の縦断方向の長さが短く計算される傾向が示された。また、平衡および非平衡流砂モデルによる河床表層粒度分布結果を比較し、水制近傍の粗粒化と細粒化の傾向は平衡流砂モデルでも再現されたが、その細粒化と粗粒化の程度が非平衡流砂モデルに比べて大きいことが示された。そして、平衡流砂モデルの計算結果は、水制頭部から下流に伸びる粗粒化縦断領域等の水制設置位置より下流側の再現性が非平衡流砂モデルに比べて悪く、砂粒の運動方程式を用いて流れと河床の局所勾配と砂粒自身の重力の影響を考慮しながら砂粒の移動経路を解くような非平衡流砂モデルによって、水制周辺の粒度分布がより良好に再現できることが示された。

そして、越流型水制についても線形渦粘性モデルと混合砂の非平衡流砂モデルを用いて河床変動計算を行い、非越流型水制と同様に最大洗掘深および洗掘孔形状、そして河床表層の再現性についても概ね良好な結果が得られ、本研究で構築した解析モデルは、混合砂河床上の越流型および非越流型水制がもたらす粒度変化を予測する上で有効なモデルであることが示された。

参考文献

- 1) 芦田和男・江頭進治・中川一 (2008) : “21世紀の河川学―安全で自然豊かな河川を目指して”, 京都大学学術出版会.
- 2) Einstein, H. A. (1950) : The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, *Tech. Bull.*, No.1026, USDA, Soil Conservation Service, pp.1-70.
- 3) Kalinske, A. A.(1947): Movement of sediment as bed load in rivers, *Trans. AGU*, Vol. 28, No.4.
- 4) 芦田和男・道上正規 (1972) : 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69.
- 5) Bagnold, R. A. : The flow of cohesionless grains in fluids, *Philosophical Trans., Royal Soci. of London*, Vol.249, 1957.
- 6) 中川博次・辻本哲郎 (1979) : 砂れきの運動に伴う移動床砂面の擾乱発生過程, 土木学会論文報告集, 第 291 号, pp.53-62.
- 7) 福岡捷二・山坂昌成 (1983) : 直線水路の交互砂州, 第 27 回水理講演会論文集, pp.703-708.
- 8) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・中藤達昭 (2001) : 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684/II-56, pp.21-34.
- 9) 関根正人・吉川秀夫 (1984) : 掃流砂の流送機構に関する研究, 土木学会論文集, 第 351 号, II-2, pp.68-75.
- 10) 関根正人・吉川秀夫 (1988) : 掃流砂の停止機構に関する研究, 土木学会論文集, 第 399 号, II-10, pp.105-112.
- 11) 関根正人 (2001) : 土砂粒子の運動の解析を基礎とした河床波の形成過程シミュレーションの試み, 土木学会論文集, No. 691 号, II-57, pp.85-92.
- 12) 関根正人 (2005) : 砂礫の運動解析を基礎とした河床波形成過程シミュレーション, 水工学論文集, 第 49 巻, pp.973-978.
- 13) 後藤仁志・酒井哲郎 (1995) : 表層せん断をうける砂層の動的挙動の数値解析, 土木学会論文集, No. 521 号, II-32, pp.101-112.
- 14) 後藤仁志・酒井哲郎・原田英治 (1999) : 移動床上の saltation 粒子の衝突・反発機構, 水工学論文集, 第 43 巻, pp. 647-652.
- 15) 後藤仁志・原田英治・酒井哲郎 (2000) : 数値移動床による混合粒径流砂の流送過程のシミュレーション, 水工学論文集, 第 44 巻, pp. 665-670.
- 16) 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・羽間義晃 (2001) : 混合粒径流砂の動的粗粒化過程の数値解析, 水工学論文集, 第 45 巻, pp. 655-660.
- 17) 笠原孟・清水康行・木村一郎・山口里美 (2011) : DEM-URANS カップリングアプローチによる Dune 発生過程の数値シミュレーション, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.835-840.
- 18) Yoshizawa, A. (1984) : Statistical analysis of the deviation of the Reynolds stress from its eddy viscosity representation, *Phys. Fluids* 27, pp.1377-1387.
- 19) Craft, T. J., Launder, B. E. and Suga, K. I. (1993) : Extending the applicability of eddy viscosity

- models thorough the use of deformation invariants and non-linear elements, Proceeding of 5th IAHR Conference on Refined Flow Modeling and Measurement, Paris, pp.125-132.
- 20) Cotton, M. A., Ismael, C. G. (1993) : Development of a two-equation turbulence model with reference to a strain parameter, Proceeding of 5th IAHR Conference on Refined Flow Modeling and Measurement, Paris, pp.117-124.
- 21) Kato, M., Launder, B.E. (1993) : The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders, Proceeding of 9th Symposium on Turbulent Shear Flows, Kyoto, Vol.1, pp.10-4-4-10-4-6
- 22) Zhu, J., Shih, T. H. (1994) : Calculations of turbulent separated flows with Two-equation turbulence models, *Computational Fluid Dynamics Journal*, Vol.3, No.3, pp.343-354.
- 23) Sofialidis, D., Prinos, P. (1999) : Numerical study of momentum exchange in compound open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.125, No.2, pp.152-165.
- 24) 木村一郎・細田尚 (1999) : 非線形 $k-\epsilon$ モデルによる開水路流れにおける大規模渦運動の三次元解析, 四日市大学環境情報論集 2(2), pp.135-162.
- 25) Rhie, C.M., Chow, W.L. (1983) : Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation, *Journal of AIAA*, Vol.21, pp.1525-1532.
- 26) Wu, W., Rodi, W., Wenka, T. (2000) : 3D Numerical modeling of flow and sediment transport in open channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp.4-15.
- 27) Van Rijn, L. C. (1984) : " Sediment transport, Part III : Bed forms and alluvial roughness." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(12), 1733-1754.
- 28) Patankar, S.V. (1980) : Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, New York.
- 29) 中川博次・辻本哲郎・村上正吾(1985) : 側岸における非平衡流砂過程, 第 29 回水理講演会論文集, pp.561-566.
- 30) 岩垣雄一 (1956) : 限界掃流力に関する基礎的研究 (I) 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp. 1-21.
- 31) 芦田和男・道上正規 (1972) : 移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 206 号, pp.59-69.
- 32) Egiazaroff, I. V. (1965) : Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, *Proc. ASCE*, Vol.91, HY4, pp.225-247.
- 33) Sekine, M., Kikkawa, H. (1992) : Mechanics of saltating grains. II, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol.118, No.4, pp.536-558.
- 34) 辻本哲郎・水上敏昭 (1985) : 円柱橋脚前面での局所洗掘機構のモデル化, 第 29 回, 水理講演会論文集, pp.591-596.
- 35) Rubey, W. W. (1933) : Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *American Journal of Science*, Vol. 25, pp.325-338.
- 36) 平野宗夫 (1971) : Armoring をともなう河床低下について, 土木学会論文報告集, 第 195 号, pp.55-65.

- 37) Liu, B.Y. (1991) : Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels, Ph.D Thesis, Kyoto University.
- 38) Zhang, H. (2005) : Study on Flow and Bed Evolution in Channels with Spur Dykes, Ph.D Thesis, Kyoto University.

第6章

結論

6.1 まとめ

本論文は、混合砂河床上の水制周辺の局所洗掘および粒度変化をテーマとし、非越流型および越流型水制周辺の移動床実験を行い、初期粒度分布と局所洗掘の関係、そして水制周辺の3次元流れ場と河床表層の粒度変化について考察し、その成果を取りまとめたものである。また、水制周辺の河床変化および河床粒度の空間変化を精度良く予測可能な数値解析モデルの構築をめざし、本研究で得られた移動床実験結果を用いて本解析モデル計算結果の妥当性を検証し、成果をまとめた。

以下に、各章での検討内容、実験及び数値解析から得られた知見を要約し、本研究の結論とする。

まず第1章では、本研究の背景と研究目的を述べ、本論文の内容と構成について記述した。

第2章では、水制に関する既往研究のレビューを実験的研究と数値解析的研究に分けて行い、これまでの研究で明らかになっていることや研究成果を示し、そして、今後の研究として残されて現在求められている研究課題と本研究の位置付けについて記述した。

第3章では、基本的な実験条件と考えられる非越流型直角水制1基に対して均一砂と混合砂河床を用いて移動床実験を行い、洗掘深と初期河床粒度分布の関係、そして水制周辺の3次元流れ場の計測を行い、水制がもたらす河床表層の粒度変化と3次元流れ構造の関係について明らかにし、以下のようにまとめた。

- ① 水制周辺の局所洗掘において、平均粒径が同等の河床条件の場合、初期河床の粒度分布の範囲が狭く幾何標準偏差 σ_g が大きい河床材料の方が最大洗掘深および洗掘量が小さくなり、 σ_g が大きくなればなるほど、アーマ・コート形成に必要な粒径の大きな砂粒の存在割合が大きくなる傾向があることを示し、水制周辺の洗掘深および洗掘量を予測する上で σ_g が重要なパラメータとなることを示した。
- ② 平坦河床上の水制周辺の流れ場は、水制背後に鉛直方向に軸を持つ循環渦が発生し、流れの3次元性は強くないことを示した。また洗掘河床上においては、洗掘孔内の馬蹄形渦、水制背後の後流渦、そして水制背後の側壁近くに堆積域の峰を側壁から若干内側へ位置させる原因となる第3の縦渦の存在を確認し、平坦河床上の流れに比べて複雑な流れ場の3次元構造を有していることが明らかとなった。
- ③ 水制設置位置より下流側の洗掘孔縁から縦断方向に伸びる狭い範囲において、馬蹄形渦によって若干上向きの流れへと偏向され、河床近傍で相対的に平面方向の流速が弱まる領域が形成さ

れていることが明らかとなった。また、水制先端の下流域の河床近傍流れにおいては舌状に流速が加速する特徴的な底面流速場が形成されることが流速場の計測より示された。

- ④ 混合砂の実験より得られた洗掘河床の表層では、水制前面から水制頭部にかけた領域と、水制頭部から下流に向かった縦断領域において顕著な粗粒化域が形成され、それは水制前面から生じている馬蹄形渦と水制背後の後流渦、そして洗掘孔の河床勾配の相互作用によって河床材料の分級現象が起こっていることが明らかとなった。
- ⑤ また、洗掘孔が十分に発達したケースにおいては、水制頭部から下流に伸びる粗粒化領域を挟むようにして、側壁近傍と水路中央側の洗掘孔の縁近くにおいて細粒化する2つの帯状縦断領域が形成されることが実験結果より示された。
- ⑥ 水制背後の細粒化領域は、水制先端域が洗掘されることで発生する後流渦によって、細粒成分が水制背後へ輸送されて形成される。また、水路中央側の洗掘孔の縁に形成される細粒化領域は、水制より上流域の洗掘孔の拡大過程において、馬蹄形渦による河床近傍流れと洗掘孔の河床勾配の影響により洗掘孔縁の若干内側に細粒分が集まり水制を迂回するように輸送され、そして、水制設置位置から下流側では、馬蹄形渦によって相対的に底面流速が低減された縦断領域が形成され、その領域に上流から細粒分が運ばれることによって縦断方向に伸びる細粒化帯状領域が形成されることが示された。

以上のように3章では、非越流型水制周辺において、河床が洗掘されることによって流れ場の3次元構造が複雑となり、河床材料が非均一な場においては多様性のある河床地形だけでなく空間的に多様性のある粒度分布環境が形成されることが確認された。

第4章では、3章の移動床実験の次のステップとして、均一砂および混合砂河床を用いて越流状態の水制工に対しての実験を行い、水制の高さと周辺の河床変化の関係、初期粒度分布と局所洗掘深の関係、そして水制高の違いが河床表層の粒度分布変化に与える影響について、非越流時の結果も含めて比較を行い考察し、以下のようにまとめた。

- ① 同一粒径の均一砂河床を用いて相対水制高のみを変化させた実験により、最大洗掘深については相対水制高（すなわち Overtopping ratio の逆数）とほぼ線形関係にあることを示し、水制周辺の最大洗掘深を予測する上で相対水制高も重要なパラメータとなることを示した。
- ② 洗掘過程後半の水制上流側と横断方向の洗掘孔拡大は、主に水中安息角による砂のずり落ち現象に支配されるために、その洗掘孔の上流側と横断方向の平面的な大きさは、最大洗掘深および相対水制高と線形関係に近いことが実験結果より示された。
- ③ 非越流に近い越流状態と非越流状態の水制がつくりだす平衡状態に近い洗掘河床の比較により、水制が越流から非越流状態になることによって水制頭部の下流域において特に洗掘が進む傾向が示され、越流状態内で相対水制高が段階的に高くなることによって進む平面的な洗掘拡大分布傾向とは異なることが明らかとなった。
- ④ 水制背後域への土砂堆積量は、越流状態においては相対水制高が大きくなれば水制背後への土砂堆積量は大きくなる傾向を示すが、非越流時が最大とはならず、非越流に近い越流状態で最大となることが示された。しかし、水制周辺の洗掘量に対する水制背後域の土砂堆積割合と見た場合、相対水制高が極端に小さい場合を除き、相対水制高が低いと洗掘した土砂は水制背後

域へ堆積する割合が高いことが分かった。

- ⑤ 混合砂河床においても、均一砂河床と同様に相対水制高が大きくなるにつれて最大洗掘深および洗掘量が大きくなる傾向を示すことが分かった。そして、3章の非越流型水制の実験結果と同様に、どの越流時の結果も σ_g が大きくなるにつれて最大洗掘深が小さくなることが示された。
- ⑥ 水制先端から下流へ伸びる洗掘の深い領域において、非越流時が最も下降流の大きさとその縦断及び横断方向の範囲が大きく、水制高が低くなればその下降流の大きさと範囲が小さくなることが計測結果より示された。
- ⑦ 水制頭部近傍の下降流は水制高が高くなると強まり、馬蹄形渦の流れもその下降流によって強くなるため、洗掘孔内の河床近傍において、水制先端から主流路側へ向かう洗掘孔底部から斜面を駆け上がる左岸方向の流れは、水制高が高い方が大きいことが示された。
- ⑧ 本実験の越流状態において、どの混合砂河床を用いた実験ケースにおいても水制背後域に細粒化領域が形成され、流れ場の計測によって、非越流時と同様に水制背後域へ細粒分を運ぶ顕著な後流渦が計測された。
- ⑨ 非越流実験では比較的顕著に形成された水路中央側の帯状細粒化領域については、越流状態ではその幅が狭くなり、水制高が低いケースにおいてはその細粒化領域が形成されないケースも確認され、越流時は非越流状態に比べて水路中央側の帯状細粒化領域が形成され難いことが確認された。
- ⑩ 水制頭部から下流に伸びる粗粒化域の横断方向の幅については、非越流時が最も広く、水制高が小さくなるにつれて粗粒化幅が小さくなる傾向が示された。

第5章では、水制工設置による周辺河床の洗掘孔形状だけでなく、周辺の粒度分布変化を精度良く予測可能な数値解析モデルを構築することを目的として、流れの3次元 RANS モデルと混合砂の非平衡流砂モデルを組み合わせた解析モデルを構築し、3章および4章で得られた実験結果を用いて解析モデルで得られるシミュレーション結果の妥当性の検証を行った。まず、非線形渦粘性モデルを用いて非越流および2つの越流状態の流れ場に適用し、実験結果を良好に再現していることが示された。また、非越流型水制周辺の3次元流れ場に対して、線形および非線形渦粘性モデルの違いが水制頭部近辺の河床近傍流れに若干の違いをもたらすが、その他の全体的な河床近傍流れに対しては両モデル共に概ね良好な再現性を有していることを示した。河床変動計算については、非線形および線形渦粘性モデル、そして混合砂の非平衡流砂モデルを用いて、非越流および2つの越流状態の水制周辺の移動床実験に対して解析を行い、河床地形および河床表層の粒度分布変化を良好に再現し、本研究の解析モデルが水制のもたらす粒度変化を予測する上で有効な解析モデルであることを示した。

6.2 今後の課題

以上、本研究では水制がもたらす局所洗掘および粒度変化に関する実験的研究および数値解析を進めてきたが、最後に今後の課題についてまとめる。

（実験に関する課題）

- (1) 本研究で行った水制に関する移動床実験は、混合砂河床を用いた研究の第一歩として、水路片側の水制 1 基に対する比較的単純で基本的な水制条件に対する実験であったが、今後は斜め型水制、T 型および L 型などの複雑な水制形状や、複数の水制で構成された水制群がもたらす粒度変化に関する研究データの蓄積が必要だと考えられる。
- (2) 本研究で用いたカラーサンドによる移動床実験は、粒径区分によって色分けし、視覚的にどの粒径がどこに多く存在するかについて定性的に平面分布を把握することができた。しかし、粒径の平面分布の定性的な傾向のみの把握では不十分で、さらなる研究の発展が必要だと考える。今後は使用するカラーサンドの色、照明、撮影方法を工夫する必要がある、そして撮影した表層河床の画像より粒度分布情報が取得できるような技術を構築する必要があると考える。今回のサンプリングを行った地点数では詳細な粒度分布の変化を捉えきれておらず、より詳細な平面的な情報を、労力と時間を然程費やさずに蓄積する技術が必要と考える。
- (3) 本研究によって、水制が河床地形だけでなく河床表層の粒度分布の多様性を創出することが示された。しかし、その粒度分布が河川環境へどのような影響を与えるのか、また、“水性動植物にとって最適な水理環境と粒度分布はどのような状態なのか”について、まだまだ不明な点が多く研究課題として残されていると考えられる。そして、水制がつくり出す粒度分布の多様性については、実河川の現地データについても不足しているため、室内実験だけでなく実河川の水制周辺の粒度分布について様々な地点で長期に亘って調査する必要がある。

（数値解析に関する課題）

- (1) 本研究の数値シミュレーションでは、水面が固定で変化しない条件の下で計算を簡単化しており、水面の取り扱いが流れ計算モデルの課題として残されている。実現象では、非越流型水制の場合は水制前面で水位が上昇、水制背後で水位が低下し、水制近傍で横断方向にも縦断方向にも水面勾配が生じる。この影響がどの程度底面流速に影響を及ぼすかは現段階では不明だが、水制近傍の水面勾配の影響は本研究で示された水制近傍の下降流について実験と解析結果の差を縮める方向に働くことが推測でき、本解析モデルの流れ及び河床変動計算の精度向上のために改良は急務である。
- (2) また渦構造を伴う水制周辺の流れ場は非定常性が強く、LES モデルのような流れの非定常性をより考慮できるようなモデルの導入が流れ場と流砂の精度向上につながると考えられる。た

だし、LES の場合は計算格子を密にとる必要性があり、計算時間に関する課題にも対処する必要がある。

- (3) 本研究の非平衡流砂モデルの pick-up された土砂の堆積過程は、step length の確率密度関数を用いており、その中の平均 step length は Sekine・Kikkawa が提案した近似式を用いている。この式は、平坦河床を想定して求められたもので、本研究の水制周辺の移動床現象においては適用範囲外であり、この点については今後の課題として残されている。Step length は主に河床の衝突現象に関係しており、混合砂河床においては粒度分布によって河床の凹凸が異なり、減摩効果なども砂粒の堆積過程に考慮する必要がある。そのため、Step length の評価には pick-up 地点の情報だけでなく、移動経路上の河床の粒度分布の影響を取り込んで、流砂の堆積過程をモデル化する必要性があると考えられる。この点については、更なる基礎的な実験が必要で、混合砂河床上の step length に関する情報の蓄積がまず必要と考えられる。
- (4) 本研究のシミュレーションでは、砂粒の輸送形態は掃流砂のみで代表させている。混合砂の計算をする際には、細粒分が粒度分布に含まれ浮遊砂形態となる可能性が高い。また、洗掘の初期過程においては、水制先端で激しく砂が巻き上がるような現象が発生しており、局所洗掘の進行速度を上昇させ、より実現象に近づけるためには、砂の巻き上げ、そして浮遊砂の移動形態を考慮する必要性があると考えられる。
- (5) 実験に関する課題と同様に、本研究の数値解析モデルが、水制群や斜め型水制や T 型、L 型および透過型水制などの複雑な水制形状がもたらす河床変化や粒度変化に対してどの程度の再現精度を有しているかを確認する必要がある、今後の課題である。

記号表

a_f, a_p, a_{nb}	=空間的な離散化のための係数 (f :CV 面, p :現在の CV, nb :隣接 CV)
A_1, A_2, A_3	=砂粒子の 1 次元・2 次元・3 次元形状係数 (=1.0, $\pi/4, \pi/6$)
b	= ϕ の生成項
B_0	=粗度パラメータ内の定数 (=5.2)
c_e	=遮蔽係数 (静止粒子に対しては 0.4, 移動粒子に対しては 1.0)
C_D	=抗力係数
C_m	=付加質量係数
C_L	=揚力係数
C_μ	=k- ϵ モデルの無次元モデル定数 (標準 k- ϵ モデルでは一定で 0.09)
d	=砂粒の粒径
d_k	=粒径階 k の砂粒の粒径
d_m	=平均粒径
d_{16}	=16%通過粒径
d_{84}	=84%通過粒径
D	=砂粒に作用する抗力
E_m, E_t, E_d	=河床の交換層, 遷移層, 堆積層の厚さ
E_r	=壁面の粗度パラメータ
f	=コントロールボリュームの表面中央点
f_i	=体積力
f_s	=step length の確率密度関数
F	=砂粒に作用する摩擦力
F_r	=フルード数
$F_{.0}$	=pick-up rate 式の経験定数
g	=重力加速度
G_*	=pick-up rate 式の河床近傍流れと砂粒移動ベクトルの偏倚係数
h_0	=水深

Hot_{ij}^{quad}	=非線形 k-εモデルの 2 次の非線形項
I	=水路勾配
k	=乱流エネルギー；=粒径階
k_L	=抗力と揚力の比
k_p	=pick-up rate 式の定数 (=0.7)
k_s	=相当粗度高さ
k_s^+	=粗度レイノルズ数 ($k_s^+ = u_* k_s / \nu$)
h_s	=掃流層厚
m	=時間ステップ
m'	=砂粒運動や粒度計算の時間ステップ
m_p	=pick-up rate 式の定数 (=3)
m_{sed}	=砂粒の仮想質量
n	=反復計算ステップ
N_b	=河床の堆積層の総数
p	=圧力 ($p = p^* + p'$)
p^*	=連続方程式を満たしていない仮の圧力
p'	=圧力の補正量
$\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$	=河床平面を表すための x-z および y-z 平面内の河床面と平行な単位ベクトル
$p_{b(i,k)}$	=メッシュ i の河床交換層の粒径階 k の含有率
$p_{d(i,k,l)}$	=メッシュ i の河床堆積層 l の粒径階 k の含有率
$p_{t(i,k)}$	=メッシュ i の河床遷移層の粒径階 k の含有率
p_s	=pick-up rate
P_f	=移流と拡散の比
P_k	=乱流エネルギーの生成項
q_B	=単位幅掃流砂量
Q	=流量
R_*	=砂粒レイノルズ数 ($=u_* d / \nu$)
$s, \Delta s$	=砂粒の離脱地点からの総移動距離, 1 ステップの移動距離
S	=表面積
S_f	=コントロールボリュームの表面積
S_{fx}, S_{fy}, S_{fz}	=コントロール表面の x, y, z 軸への投影面積
S_p	=砂粒離脱地点メッシュの鉛直方向射影面積
S_{ij}	=平均歪み速度テンソル
$S_{k\varepsilon}$	=ストレイン・パラメータ
t	=時間
u	=流速の x 成分
u_b	=底面近傍流速

$u_{f\perp}$	=面の中心において面に垂直な流速成分
u_i	=流速の i 成分(i=1,2,3, i.e, (x, y, z))
u_i^*, u_i'	=流速の i 成分の仮の値と補正量
u_{sed}	=砂粒の移動速度
u_*	=摩擦速度
u_{*c}	=移動限界摩擦速度
u_{*ck}	=粒径階 k の代表粒径に対する移動限界摩擦速度
u_{*cm}	=平均粒径に対する移動限界摩擦速度
$u_{//}$	=壁面近傍で壁に沿う流速成分
u^+	=無次元化された壁面流速
U_0	=接近流速
v	=流速の y 成分
V	=コントロールボリュームの体積
V_d	=単位時間あたりの deposition 量
V_p	=単位時間あたりの離脱土砂量
w	=流速の z 成分
W	=砂粒に作用する水中重力
w_0	=砂粒の沈降速度
x	=デカルト座標成分 x
y	=デカルト座標成分 y
z	=デカルト座標成分 z
z_b	=河床高
z_0	=基準高
z_{\perp}	=壁面 CV 中心から壁までの距離
z_+	=壁座標 ($z_+ = (u_* z_{\perp})/\nu$)
α	=砂粒の移動方向と河床の最大傾斜方向のなす角度
α_2	=平均 step length の近似式の定数
α_{ϕ}	=緩和係数
Γ	=拡散係数
δ_{ij}	=クロネッカーのデルタ
$\mathcal{E}_A, \mathcal{E}_B$	=安息角による土砂のスライドによる河床変化量
ΔB	=粗度関数
Δt	=流れ計算の時間間隔
Δt_p	=pick-up 計算を行う時間間隔
Δt_s	=砂粒粒子の運動計算を行う時間間隔
$\Delta z_b, \Delta z_{b(k)}$	=1 ステップの総河床変動量, 粒径階 k に関する 1 ステップの河床変動量
\mathcal{E}	=エネルギー散逸率

κ	=Karman 定数
$\lambda_{(k)}$	=粒径階 k の平均 step length
μ_k	=砂の動摩擦係数
μ_s	=砂の静止摩擦係数
π	=円周率
θ_b	=河床最大傾斜方向の勾配角
θ_{bx}, θ_{by}	=x, y 方向の河床勾配
$\theta_{b\max}$	=限界河床勾配
θ_p	= \mathbf{p}_{b1} と \mathbf{p}_{b2} のなす角度
ν	=動粘性係数
ν_t	=渦粘性係数
ρ	=水の密度
σ	=砂粒子の密度
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_{1\varepsilon}, \sigma_{2\varepsilon}$	=k-εモデルの定数群
τ_{ij}	=レイノルズ応力テンソル
τ_w	=壁面せん断力ベクトル
τ_*	=無次元掃流力
τ_{*c}	=無次元限界掃流力
τ_{*ck}	=粒径階 k の無次元限界掃流力
Λ	=平均 step length
ϕ	=スカラー量またはベクトル構成要素
ϕ_b	=pick-up rate 式の河床勾配係数
ψ	=河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度
Ω	=ローテーション・パラメータ

学位論文に関連のある論文リスト

- 1) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 混合砂河床を用いた水制周辺の局所洗掘に関する研究, 日本自然災害学会学術講演会, 第 28 回, I-3-5, pp.31-32, 9 月, 2009.
- 2) Zhang, H., Nakagawa, H., Mizutani, H.: Bed variation around spur dyke under non-uniform sediment transport, Proceedings of 17th IAHR-APD congress, Auckland, New Zealand, Memory Stick, No.3a045, February 21-24, 2010.
- 3) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 第 54 巻, pp.805-810, 2 月, 2010.
- 4) Zhang, H., Nakagawa, H. and Mizutani, H.: Non-uniform sediment transport around a spur dyke, Proceedings of the International Symposium on Water and Sediment Disasters in East Asia, Kyoto, Japan, pp.96-107, March 23-25, 2010.
- 5) Mizutani, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., and Zhang, H.: Experimental study of bed evolution around non-submerged spur dyke using color-coded non-uniform sediment, Proceedings of International Symposium on Sediment Disasters & River Environment in Mountainous Area, Kyoto, Japan, pp.69-70, August, 2010. (Poster Session)
- 6) 張浩, 中川一, 水谷英朗: 河川構造物周辺における河床材料の粒度変動特性に関する研究, 近畿建設協会研究助成発表会, 大阪, pp.21-28, 9 月, 2010.
- 7) Zhang, H., Nakagawa, H. and Mizutani, H.: Local scour and sediment size variation around a spur dyke, Proceedings of the 11th International Symposium on River Sedimentation, Stellenbosch, South Africa, 11p, CD-ROM, September 6-9, 2010.
- 8) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: OpenMP を用いた非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動計算, 日本自然災害学会学術講演会, 第 29 回, II-7-5, pp.145-146, 9 月, 2010.
- 9) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 非越流・不透過型水制周辺の局所洗掘および粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 第 55 巻, pp.829-834, 2 月, 2011.
- 10) Zhang, H., Mizutani, H. and Nakagawa, H.: Impact of grain size distribution on bed topography around a groyne, Proceedings of 34th IAHR congress, Brisbane, Australia, CD-ROM, 26 June to 1 July, 2011. (Poster Session)
- 11) Mizutani, H., Nakagawa, H., Zhang, H., Kawaike, K., and Baba, Y.: Influence of Overtopping Ratio on Scouring and Sediment Sorting around Spur Dyke, RCEM2011, September, 2011. (In press 2011).
- 12) 水谷英朗, 中川一, 川池健司, 馬場康之, 張浩: 水制周辺の河床変化および砂の分級現象, 京都大学防災研究所年報, 第 54 号 B, 10 月, 2011 (In press 2011).

謝辞

本研究は、京都大学防災研究所 宇治川オープンラボラトリーで実施した移動床実験及び数値解析の成果を取りまとめたものである。本研究を進めるにあたり、多くの方々に御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

まず、本研究の遂行にあたり、終始懇切なご指導を賜った、京都大学防災研究所 教授 中川 一 先生に深甚の謝意を表します。私が博士課程の3年間を有意義に過ごし、博士論文をまとめることができたのは、先生の的確なご指導とご助言のおかげです。この3年間で得た経験は、今後の人生の心の糧となるものです。

本論文の草稿を査読いただき、貴重な御意見・御指導を賜りました京都大学 教授 角 哲也 先生に謹んで感謝の意を表します。

学年進行時審査などで貴重な御意見・御指導を賜りました京都大学防災研究所 教授 藤田 正治 先生に謹んで感謝の意を表します。

研究面だけでなく私生活の面で親身になって相談に乗って下さった京都大学防災研究所 准教授 川池 健司 先生、ならびに本研究の数値計算を行う上で計算機環境を整えて下さり、常に温かいお心遣いを賜った京都大学防災研究所 准教授 馬場 康行 先生、そして研究に対して終始適切な御助言を頂いた京都大学防災研究所 助教 張 浩 先生に深く御礼申し上げます。

また、株式会社ハイドロソフト技術研究所 代表取締役社長 劉 炳義氏には京都大学で学ぶ機会を与えて下さり、そして終始温かい激励の言葉と様々なご支援を頂戴しました。そして同じく 副社長 韓 銅珍氏ならびに常務取締役 森浦 光一氏には温かい激励の御言葉と生活面において気配りを賜りました。

また、博士課程からの配属にも関わらず温かく迎えて頂いた京都大学防災研究所 流域災害研究センター 河川防災システム領域の研究室の皆様、そして宇治川オープンラボラトリーのスタッフの皆様は心より感謝申し上げます。Hiroshi Teraguchi さんには、同じ水制に関する研究をする先輩として日頃から活発な議論を行い色々勉強させていただきました。住友 秀成君（現住友商事株式会社）には、4章の越流型水制の実験を手伝っていただきました。そして、研究室秘書 杉村 夏世さんには日頃の様々な事務手続きに関して迅速に処理していただき、またいろいろとご迷惑をおかけしたことを思います。ここに感謝の意を表します。

最後に、本研究の遂行から博士号取得に至る期間、著者ならびに妻と子を支えてくれた父と母、親族の方々に深く感謝いたします。妻にとっては転勤、転職、出産、育児と激動の3年間であったにも関わらず、著者を終始支え続けてくれたことに心より感謝いたします。

皆様のご協力がなくしては、本研究はなし得ませんでした。心より御礼を申し上げます。

水谷 英朗